

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 18, № 4. 2021
Сквозной номер выпуска – 80
Vol. 18, no. 4. 2021
Continuous issue – 80

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 18, № 4. 2021. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 80
(VOL. 18, NO. 4. 2021. CONTINUOUS ISSUE – 80)**

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Rospechat Agency's catalog

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

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

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

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

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

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

05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),

05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка».

Журнал является членом:

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

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 31.08.2021. Дата выхода в свет 12.09.2021. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная.

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

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

05.22.10 – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

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

05.23.05 – Building materials and products (Technical Sciences),

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika

The Journal is a member of

the Directory of Open Access Journals (DOAJ),

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

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



Signed in print on 31.08.2021. Publication date is 12.09.2021. Format is 60 × 84 1/4.

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

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

Content is available under license CC BY.

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРПЫ», 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. Днепропетровск, Украина
Scopus Author ID 6505880056

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

Viktor V. 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
Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID ID** 0000-0001-6521-9423

Andrey B. Ponomarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Technical University, Perm, Russia

Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID ID** 0000-0001-6521-9423

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

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

Václav Skala, Professor of the West Bohemia University, Plsen, Czech Republic

Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011, **ORCID ID** 0000-0001-8886-4281

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.А. Николаев

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОВШЕЙ И НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ
АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ..... 364**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.Д. Горбунова, О.Ю. Смирнова

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯРНОГО
ГОРОДСКОГО МАРШРУТА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОБУСА..... 378**

А.Н. Котомчин

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВАННЫ ХРОМИРОВАНИЯ
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА 390**

С.В. Корнеев, С.В. Пашукевич

**ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
МОТОРНОГО МАСЛА 406**

Н.Н. Якунин, О.Ю. Фролов, Н.В. Якунина, В.В. Котов

**УКРУПНЁННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ
АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНА В КАДРАХ
С ПРОФИЛЬНЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ..... 416**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Л.Х. Загороднюк, М.Ю. Елистраткин, Д.С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ 3D АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 428

Т.А. Козленко, С.В. Придвижкин

**ВІМ И VR: РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ
ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ
РЕАЛЬНОСТИ 440**

В.И. Сологаев

**ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ
В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ 450**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Vladimir A. Nikolayev

STABILITY OF BUCKET MOVEMENT AND DIRECTION OF MOVEMENT OF THE CONTINUOUS UNIT TO FORM THE UNDERLYING LAYER OF THE ROAD	365
---	------------

PART II. TRANSPORT

Anastasia D. Gorbunova, Olga Yu. Smirnova

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR SELECTING A RATIONAL REGULAR URBAN ROUTE FOR ELECTRIC BUS OPERATION	379
---	------------

Aleksei N. Kotomchin

OPTIMIZATION OF THE CHROME PLATING BATH OPERATION DURING THE RESTORATION OF VEHICLE PARTS	391
--	------------

Sergei V. Korneev, Sofia V. Pashukevich

THE INFLUENCE OF WATER ON THE CHANGE IN ENGINE OIL QUALITY INDICATORS	407
--	------------

Nikolay N Yakunin, Oleg U. Frolov, Natalia V. Yakunina, Vitaly V. Kotov

AGGREGATED METHODOLOGY FOR DETERMINING HUMAN RESOURCES NEEDS OF THE ROAD TRANSPORT SECTOR IN THE REGION WITH SPECIALIZED EDUCATION	417
---	------------

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Lilia Kh. Zagorodnuk, Mikhail Yu. Elistratkin, Daniil S. Podgornyi, Al Mamuri Saad Khalil Shadid

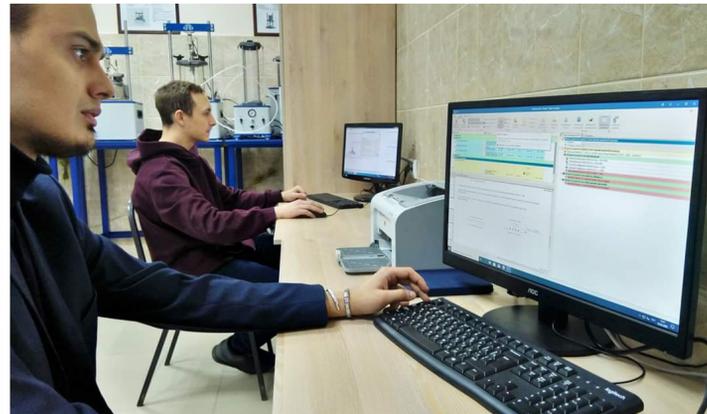
COMPOSITE BINDERS FOR 3D ADDITIVE TECHNOLOGIES	429
---	------------

Tatiana A. Kozlenko, Stanislav V. Pridvizhkin

BIM AND VR: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODULE FOR THE INTEGRATION OF BUILDING INFORMATION MODELLING AND VIRTUAL REALITY	441
---	------------

Valery I. Sologaeв

USE OF FILTRATION AND ELECTRICITY ANALOGY IN SIMULATION OF UNDERFLOODING PROTECTION IN URBAN CONSTRUCTION	451
--	------------



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



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

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-364-376>

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОВШЕЙ И НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А. НиколаевФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. Рабочими органами агрегата являются ковши, осуществляющие резание и транспортирование грунта. Для уравнивания этих сил и моментов в поперечно-вертикальной плоскости, относительно направления движения ковшей, служат поддерживающие планки с гидроцилиндрами поддержки. Для создания и регулирования давления в гидроцилиндрах поддержки на энергетическом устройстве установлены два гидропневмоаккумулятора управления поддерживающими планками. Часть сил и моментов через поддерживающие планки, гидроцилиндры поддержки, раму рабочей части агрегата передаётся на энергетическое устройство, служащее для привода агрегата. При работе агрегата сопротивление грунта резанию непрерывно изменяется, поэтому изменяются силы и моменты, передаваемые на энергетическое устройство. При работе необходима устойчивость прямолинейного хода агрегата. Для обеспечения устойчивости перемещения ковшей и направления движения агрегата следует сначала рассмотреть процесс заполнения ковшей грунтом.

Методика исследования. На основе конструктивной компоновки выявлено количество ковшей, наполняемых грунтом. Допустим, заполнение ковшей грунтом происходит постепенно и равномерно. Отсюда выявлено увеличение нагрузки на правую и левую поддерживающую планку каждым последующим, по ходу, ковшом по мере его заполнения. Путём сложения вертикальных сил определена величина и положение суммарной нагрузки на поддерживающие планки. Определено сопротивление перемещению левых и правых колёс рабочей части агрегата, обусловленное нагрузкой от ковшей на поддерживающие планки, силой тяжести поднимаемого грунта, силой тяжести рабочей части агрегата. Выявлена суммарная горизонтальная сила воздействия грунта на ковши, направленная по ходу агрегата. Приведена методика расчёта положения вектора тяги энергетического устройства.

Результаты. На основе разработанной методики определены диаметры гидроцилиндров поддержки и номинальное давление в гидропневмоаккумуляторах управления правыми и левыми поддерживающими планками. Предложена конструктивная компоновка навески энергетического устройства и системы автоматической корректировки положения вектора тяги энергетического устройства в зависимости от свойств разрабатываемого грунта.

Заключение. На основании проведённых теоретических исследований вычислены диаметры гидроцилиндров поддержки и номинальное давление в гидропневмоаккумуляторах управления правыми и левыми поддерживающими планками. Дан пример расчёта положения вектора тяги энергетического устройства. Предложена конструктивная компоновка системы автоматической корректировки положения вектора тяги энергетического устройства в зависимости от свойств разрабатываемого грунта и общая компоновка энергетического устройства. Проведённые теоретические исследования позволяют обеспечить устойчивость перемещения ковшей и направления движения агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: агрегат непрерывного действия, грунт, поддерживающие планки, диаметры гидроцилиндров, давление в гидропневмоаккумуляторах, вектор тяги, энергетическое устройство, автоматическая корректировка.

Поступила 31.07.21, принята к публикации 31.08.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Николаев В.А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Николаев, В.А. Устойчивость перемещения ковшей и направления движения агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-364-376> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 364-376.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-364-376>

STABILITY OF BUCKET MOVEMENT AND DIRECTION OF MOVEMENT OF THE CONTINUOUS UNIT TO FORM THE UNDERLYING LAYER OF THE ROAD

Vladimir A. Nikolayev
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. The unit of continuous action for the formation of the underlying layer is designed to increase labor productivity in the construction of roads and other objects, for the construction of which it is necessary to remove the upper layer of soil. The working bodies of the unit are buckets that cut and transport soil. To balance these forces and moments in the transverse-vertical plane, relative to the direction of movement of the buckets, support bars with support hydraulic cylinders are used. To create and regulate the pressure in the support hydraulic cylinders, two hydraulic pneumatic accumulators for controlling the supporting strips are installed on the power device. Part of the forces and moments through the supporting strips, support hydraulic cylinders, the frame of the working part of the unit is transmitted to the energy device that serves to drive the unit. During the operation of the unit, the resistance of the soil to cutting changes continuously. Therefore, the forces and moments transmitted to the energy device change. During operation, the stability of the rectilinear course of the unit is necessary. To ensure the stability of the movement of buckets and the direction of movement of the unit, you should first consider the process of filling the buckets with soil.

The method of research. On the basis of the constructive layout, the number of buckets filled with soil was revealed. Suppose the filling of buckets with soil occurs gradually and evenly. Hence, an increase in the load on the right and left support bar was revealed by each subsequent bucket as it is filled. By adding the vertical forces, the value and position of the total load on the supporting bars are determined. The resistance to the movement of the left and right wheels of the working part of the unit, due to the load from the buckets to the supporting strips, the gravity of the raised soil, the gravity of the working part of the unit, is determined. The total horizontal force, the impact of soil on the buckets, directed along the course of the unit, was revealed. The method of calculating the position of the thrust vector of the energy device is given.

Results. On the basis of the developed technique, the diameters of the support hydraulic cylinders and the nominal pressure in the hydraulic pneumatic accumulators of the control of the right and left support strips were determined. A constructive layout of the hinged energy device and a system for automatic adjustment of the position of the thrust vector of the energy device depending on the properties of the developed soil is proposed.

Conclusion. On the basis of the theoretical studies, the diameters of the support hydraulic cylinders and the nominal pressure in the hydraulic pneumatic accumulators of the control of the right and left support strips were calculated. An example of calculating the position of the thrust vector of an energy device is given. The constructive arrangement of the system of automatic adjustment of the position of the thrust vector of the energy device depending on the properties of the developed soil and the general layout of the energy device is proposed. The conducted theoretical studies allow to ensure the stability of the movement of buckets and the direction of movement of the continuous unit for the formation of the underlying layer of roads.

KEYWORDS. Continuous unit, soil, supporting slats, diameters of hydraulic cylinders, pressure in hydropneumo accumulators, thrust vector, power device, automatic adjustment.

Submitted 31.07.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

© Nikolayev V.A., 2021



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

For citation: Nikolayev V.A. Stability of bucket movement and direction of movement of the continuous unit to form the underlying layer of the road. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 364-376. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-364-376>.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. На основе анализа перемещения ковша при его заполнении грунтом выявлены диаметры гидроцилиндров поддержки.

2. Определено номинальное давление в гидропневмоаккумуляторах управления правыми и левыми поддерживающими планками.

3. Приведён пример расчёта положения вектора тяги энергетического устройства.

4. Предложена конструктивная компоновка системы автоматической корректировки положения вектора тяги энергетического устройства в зависимости от свойств разрабатываемого грунта и общая компоновка энергетического устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя (патент РФ №2689007) предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. Рабочими органами агрегата являются ковши, осуществляющие резание и транспортирование грунта. Теоретические основы резания грунта, в том числе и ковшами^{1,2}, весьма подробно рассмотрены в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22,]. Однако ковши, используемые в предлагаемом агрегате, имеют сложную форму [23, 24, 25], содержат консольный, правый и нижний нож. Ковши присоединены к цепям, поэтому при резании грунта силы и моменты, действующие на ковши, передаются на цепи. Для уравнивания этих сил и моментов в поперечно-вертикальной плоскости, относительно направления движения ковшей, служат опорные катки и поддерживающие планки [27] с гидроцилиндрами поддержки. Для создания и регулирования давления в гидроцилиндрах поддержки на энергетическом устройстве установлены два гидропневмоаккумулятора управления поддерживающими планками. Один гидропневмоаккумулятор поддерживает давление в левых, по ходу ковшей, гидроцилиндрах поддержки, другой – в пра-

вых. Необходимо определить номинальное давление в гидропневмоаккумуляторе управления левыми поддерживающими планками и гидропневмоаккумуляторе управления правыми поддерживающими планками, диаметры гидроцилиндров поддерживающих планок.

Часть сил и моментов через поддерживающие планки, гидроцилиндры поддержки, раму рабочей части агрегата передаётся на энергетическое устройство, служащее для привода агрегата. При работе агрегата сопротивление грунта резанию непрерывно изменяется, поэтому изменяются силы и моменты, передаваемые на энергетическое устройство. Но, несмотря на изменение сил и моментов, при работе необходима устойчивость прямолинейного хода агрегата. Для обеспечения устойчивости перемещения ковшей и направления движения агрегата следует сначала рассмотреть процесс заполнения ковшей грунтом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Допустим, заполнение ковшей грунтом происходит постепенно и равномерно. Из конструктивной компоновки максимальное количество ковшей, наполняемых грунтом, $n_{эп} = 11$. Ковш №1 только начинает заполняться грунтом, поэтому предположим, что вертикальная нагрузка правой стороны этого ковша $F_{kz \min пр}$ [27] воздействует только на правые опорные катки ковша, но не воздействует на правую поддерживающую планку, то есть нагрузка от ковша №1 на правую поддерживающую планку равна нулю. Допустим, гидросистема, управляющая поддерживающими планками, настроена так, что в процессе заполнения вертикальная нагрузка, которая воздействует на правые опорные катки ковша, постоянна и равна $F_{kz \min пр}$. Поскольку максимальная нагрузка на правые опорные катки и поддерживающие планки $F_{kz \max пр}$, то максимальная нагрузка на правую поддерживающую планку равна разности

$$F_{kz \max пр} - F_{kz \min пр}. \quad (1)$$

Следовательно, каждый последующий, по

¹ Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. М.: Машиностроение, 1989. С. 145–153.

² Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

ходу, ковш, по мере его заполнения, будет увеличивать нагрузку на правую поддерживающую планку на

$$F_{ппп} = \frac{F_{кз max np} - F_{кз min np}}{n_{эп} - 1}. \quad (2)$$

Аналогично определим увеличение нагрузки $F_{ппп}$ на левую поддерживающую планку, создаваемую каждым последующим ковшем. Сложив последовательно вертикальные силы воздействия каждого ковша на поддерживающие планки, определим суммарную нагрузку на поддерживающие планки. Представив суммарную нагрузку сосредоточенной силой $F_{\Sigma кз}$, определим точку её приложения. Отсюда выявим распределение суммарной нагрузки от воздействия ковшей на поддерживающие планки, приходящейся на левые опорные колёса $F_{\Sigma кз л}$ рабочей части агрегата и на правые опорные колёса – $F_{\Sigma кз п}$. Приняв коэффициент сопротивления качению колеса, определим сопротивление перемещению левых и правых колёс рабочей части агрегата, обусловленное нагрузкой от ковшей на поддерживающие планки:

$$F_{\Sigma с к з л} = f_k F_{\Sigma к з л}; F_{\Sigma с к з п} = f_k F_{\Sigma к з п}. \quad (3)$$

Сила тяжести поднимаемого грунта $G_{пз}$ [27] полностью воздействует на левые колёса. Сопротивление перемещению агрегата, обусловленное тяжестью поднимаемого грунта,

$$F_{пг} = f_k G_{пз}. \quad (4)$$

Суммарное сопротивление перемещению рабочей части агрегата, воздействующее на левые колёса,

$$F_{пк} = F_{ткп} + F_{\Sigma с к з л} + F_{пг}, \quad (5)$$

где $F_{ткп}$ – сопротивление перемещению левых опорных колёс, обусловленное долей силы тяжести рабочей части агрегата, воздействующей на левые колёса.

Суммарное сопротивление перемещению рабочей части агрегата, воздействующее на правые колёса,

$$F_{пк} = F_{ткп} + F_{\Sigma с к з п}, \quad (6)$$

где $F_{ткп}$ – сопротивление перемещению правых опорных колёс, обусловленное долей силы тяжести рабочей части агрегата, воздействующей на правые колёса.

Суммарная горизонтальная сила воздействия грунта на ковши, направленная по ходу агрегата,

$$F_{\Sigma к у} = F_{к у} n_{эп}. \quad (7)$$

Приложим силу сопротивления грунта внедрению рыхлителей $F_{\Sigma \Gamma + д}$ [27], общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом $F_{кх}$, суммарную горизонтальную силу $F_{\Sigma к у}$, действующую на ковши, сопротивление перемещению опорных колёс $F_{пк}$ и $F_{пк}$ к соответствующим точкам агрегата. Обозначим произвольную точку O , лежащую на прямой, параллельной центральной линии рабочей части агрегата и проходящей через центр масс энергетического устройства. Сумма моментов относительно точки O должна быть равна нулю:

$$\Sigma M_O = 0. \quad (8)$$

Отсюда определим «х» – расстояние от центра масс энергетического устройства до центральной линии левых колёс по направлению движения агрегата. Вектор тяги энергетического устройства должен располагаться на расстоянии x от центральной линии левых колёс.

Гидропневмоаккумулятор управления левыми поддерживающими планками и гидропневмоаккумулятор управления правыми поддерживающими планками создаёт, соответственно, равное давление в гидроцилиндрах поддержки левых и правых поддерживающих планок. Между тем нагрузка на каждую последующую поддерживающую планку увеличивается по мере заполнения ковша. Поэтому внутренний диаметр каждого последующего, по ходу ковшей, гидроцилиндра поддержки левых и правых поддерживающих планок должен увеличиваться.

Силу тяжести участка цепи, воздействующую на один ковш, обозначим $G_{уц}$. На участке воздействия ковша №1 на правую поддерживающую планку расчётная нагрузка равна нулю. Усилие воздействия штока гидроцилиндра поддержки на правую поддерживающую планку на участке ковша №2:

$$F_w = F_{ппп} + G_{уц}. \quad (9)$$

С другой стороны усилие воздействия штока гидроцилиндра

$$F_w = \frac{\pi d^2}{4} p,$$

где d – внутренний диаметр гидроцилиндра поддержки правой поддерживающей планки №2; p – номинальное давление рабочей жидкости.

Отсюда номинальное давление в гидропневмоаккумуляторе управления правыми поддерживающими планками

$$p = \frac{4 F_{\omega}}{\pi d^2}. \quad (10)$$

Внутренние диаметры гидроцилиндров поддержки следующих правых поддерживающих планок определим по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 F_{\omega}}{\pi p}}. \quad (11)$$

Аналогично вычислим номинальное давление в гидропневмоаккумуляторе управления левыми поддерживающими планками и диаметры гидроцилиндров поддержки левых поддерживающих планок.

Свойства разрабатываемого грунта изменяются. В соответствии с изменением свойств разрабатываемого грунта должно изменяться давление в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками. Для этого на средней раме и правой раме агрегата установлены датчики перемещения. При увеличении вертикальной нагрузки на ковш он начинает заглубляться, датчики перемещения реагируют на это. В кабине энергетического средства установлен блок управления и сигнализации, который суммирует сигналы датчиков перемещения и выдаёт команды на повышение или понижение давления в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками. Давление в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками увеличивается. Если вертикальная нагрузка на ковш уменьшается, он начинает выглубляться, давление в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками уменьшается. Чтобы не было ложного срабатывания при местном понижении рельефа, давление в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками изменяется только при поступлении сигнала от нескольких датчиков перемещения.

На энергетическом устройстве установлены также гидропневмоаккумуляторы управле-

ния опорными колёсами. Они уравнивают вертикальную нагрузку, создаваемую рабочей частью агрегата. Поскольку она частично зависит от свойств разрабатываемого грунта, то давление в гидропневмоаккумуляторах управления опорными колёсами должно изменяться в зависимости от свойств разрабатываемого грунта. Для этого параллельно команде на повышение или понижение давления в гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками блок управления и сигнализации выдаёт команды на повышение или понижение давления в гидропневмоаккумуляторах управления опорными колёсами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчёты ведём на основании ранее полученных результатов [25, 26, 27]. Минимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки $F_{kz\ min} = 458\ H$. Максимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки $F_{kz\ max} = 1538\ H$. Минимальная нагрузка на правые опорные катки и поддерживающие планки $F_{kz\ min\ пр} = 216\ H$, на левые поддерживающие планки $F_{kz\ min\ лев} = 242\ H$. Максимальная нагрузка на правые опорные катки и поддерживающие планки $F_{kz\ max\ пр} = 726\ H$, на левые поддерживающие планки $F_{kz\ max\ лев} = 812\ H$. Нагрузка на опорные катки, постоянна и равна $F_{kz\ min\ пр} = 216\ H$. Максимальная нагрузка на правую поддерживающую планку (1)

$$F_{kz\ max\ пр} - F_{kz\ min\ пр} = 726 - 216 = 510\ H.$$

Следовательно, каждый последующий, по ходу, ковш будет увеличивать нагрузку на правую поддерживающую планку на (2) $F_{ппп} = \frac{510}{11-1} = 51\ H$.

Аналогично, каждый последующий ковш будет увеличивать нагрузку на левую поддерживающую планку на $F_{ппп} = 57\ H$. Распределение нагрузки на поддерживающие планки представлено в таблице 1.

Сложим последовательно эти параллельные вертикальные силы (рисунок 1).

Таблица 1
Распределение нагрузки на поддерживающие планки

Table 1
Load distribution on the support strips

Номер ковша	Нагрузка на правую поддерживающую планку, Н	Нагрузка на левую поддерживающую планку, Н	Нагрузка на правую и левую поддерживающие планки, Н
1	0	242	242
2	51	299	350
3	102	356	458
4	153	413	566
5	204	470	674
6	255	527	782
7	306	584	890
8	357	641	998
9	408	698	1106
10	459	755	1214
11	510	812	1322
Σ			8602

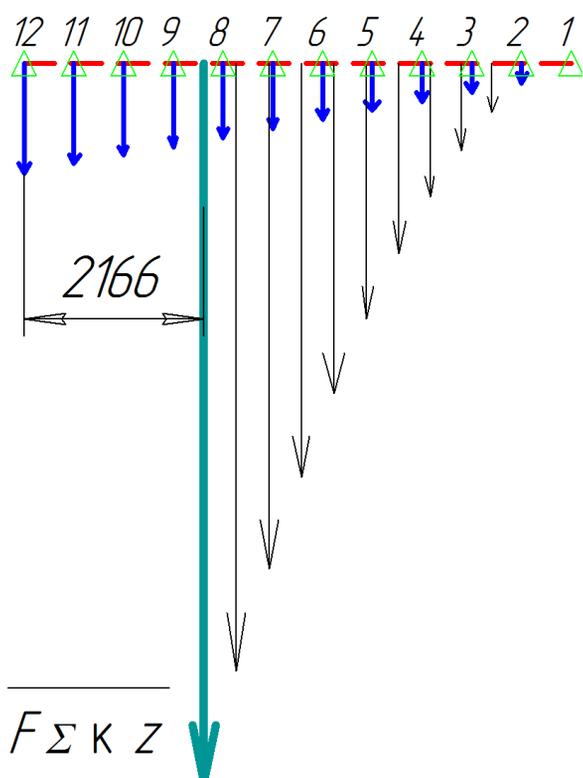


Рисунок 1 – Сложение нагрузок на поддерживающие планки

Figure 1 – Adding loads to the supporting strips

Согласно конструктивной компоновке агрегата распределение суммарной нагрузки от воздействия ковшей на поддерживающие планки: на левые опорные колёса – $F_{\Sigma KZЛ} = 5940 \text{ Н}$ [27], на правые опорные колёса – $F_{\Sigma KZП} = 2662 \text{ Н}$. Допустим, коэффициент сопротивления качению колеса $f_k = 0,15$. Соответственно, сопротивление перемещению левых и правых колёс рабочей части агрегата, обусловленное нагрузкой на поддерживающие планки (3),

$$F_{\Sigma CKZЛ} = 0,15 \cdot 5940 = 891 \text{ Н};$$

$$F_{\Sigma CKZП} = 0,15 \cdot 2662 = 399 \text{ Н}.$$

Сила тяжести поднимаемого грунта $G_{пг} = 6664 \text{ Н}$ [27]. Она полностью воздействует на левые колёса. Сопротивление перемещению агрегата, обусловленное тяжестью поднимаемого грунта (4),

$$F_{пг} = 0,15 \cdot 6664 = 1000 \text{ Н}.$$

Масса рабочей части агрегата 4 350 кг, сила тяжести – 42 630 Н. Сила тяжести рабочей части агрегата распределена неравномерно: на левые, по ходу агрегата, опорные колёса ориентировочно 31 800 Н, на правые – 10 830 Н. Сопротивление перемещению левых опорных колёс, обусловленное частью силы тяжести рабочей части агрегата, $F_{ТКЛ} = 0,15 \cdot 31800 = 4770 \text{ Н}$.

Сопrotивление перемещению правых опорных колёс, обусловленное частью силы тяжести рабочей части агрегата, $F_{ткп} = 0,15 \cdot 10830 = 1625 \text{ Н}$.

Суммарное сопротивление перемещению рабочей части агрегата, воздействующее на левые колёса (5),

$$F_{лк} = 4770 + 891 + 1000 = 6661 \text{ Н}.$$

Суммарное сопротивление перемещению рабочей части агрегата, воздействующее на правые колёса (6),

$$F_{пк} = 1625 + 399 = 2024 \text{ Н}.$$

При разработке глинистого и суглинистого грунта сила сопротивления грунта внедрению рабочих органов всех рыхлителей агрегата – $F_{\Sigma \Gamma + Д} = 15835 \text{ Н}$ [27]. Общее максимальное

тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом $F_{кx} \approx 11870 \text{ Н}$. Горизонтальная поперечная сила, действующая на один ковш и направленная по ходу агрегата $F_{кy} = 414 \text{ Н}$. Максимальное количество ковшей, наполняемых грунтом, $n_{\text{зр}} = 11$. Поэтому суммарная горизонтальная сила, действующая на ковши, направленная по ходу агрегата (7), $F_{\Sigma кy} = 414 \cdot 11 = 4554 \text{ Н}$.

На рисунке 2 приложим силу $F_{\Sigma \Gamma + Д}$ сопротивления грунта внедрению рабочих органов всех рыхлителей агрегата при разработке глинистого и суглинистого грунта, общее максимальное тяговое усилие $F_{кx}$ перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом, суммарную горизонтальную силу $F_{\Sigma кy}$, действующую на ковши, сопротивление перемещению опорных колёс $F_{лк}$ и $F_{пк}$ к соответствующим точкам агрегата.

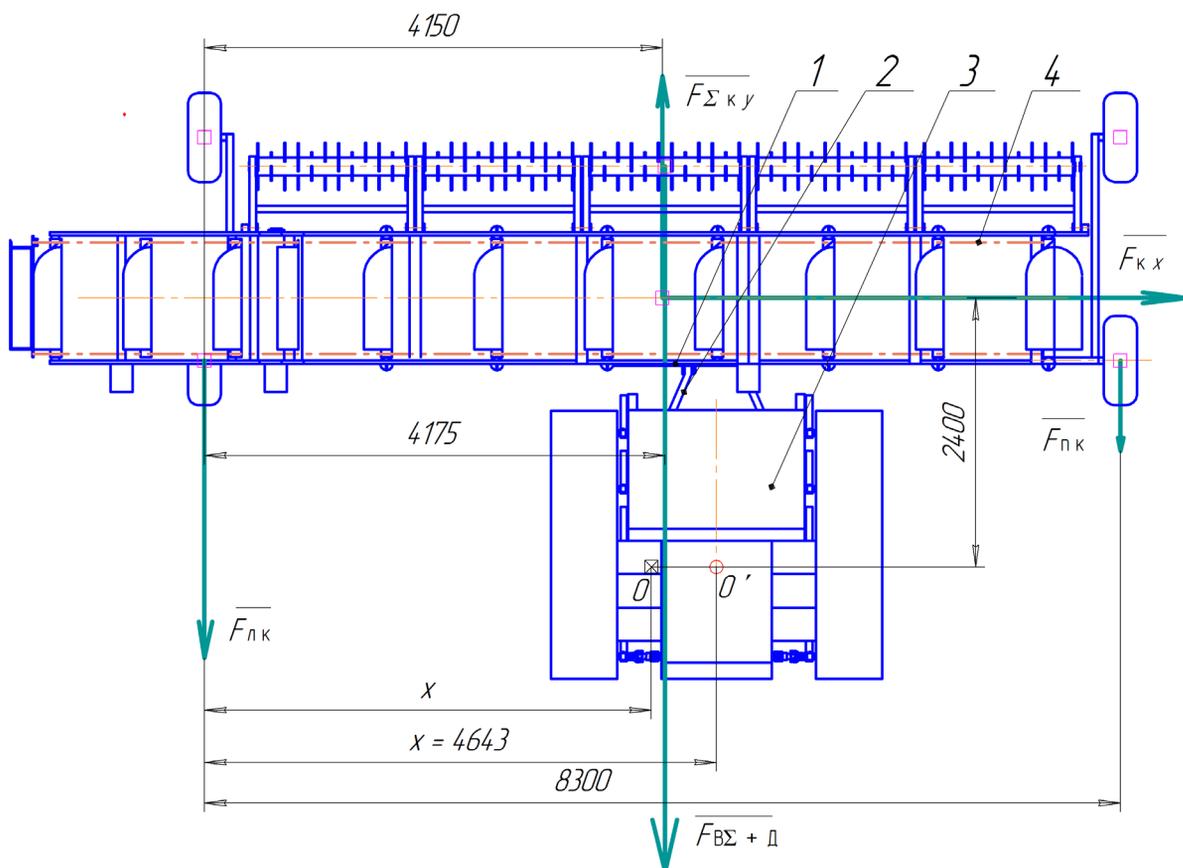


Рисунок 2 – К определению устойчивости прямолинейного хода агрегата: 1 – плита; 2 – навеска; 3 – энергетическое устройство; 4 – рабочая часть агрегата

Figure 2 – To determine the stability of the straight line of the unit: 1 – plate; 2 – hinged; 3 – energy device; 4 – working part of the unit

Таблица 2
Диаметры гидроцилиндров поддержки

Table 2
Support cylinder diameters

Но- мер ковша	Нагрузка на правую под- держивающую планку, Н	Диаметр гидроцилиндра правой поддерж. планки, мм	Нагрузка на левую под- держивающую планку, Н	Диаметр гидроцилиндра левой поддерж. планки, мм
1	0	-	242	25
2	51	16	299	27
3	102	20	356	29
4	153	23	413	31
5	204	25	470	33
6	255	28	527	35
7	306	30	584	37
8	357	32	641	38
9	408	34	698	40
10	459	36	755	41,5
11	510	38	812	43

Обозначим произвольную точку O , лежащую на прямой, параллельной центральной линии рабочей части агрегата и проходящей через центр масс энергетического устройства. Расстояние от центра масс энергетического устройства до центральной линии левых колёс по направлению движения агрегата обозначим « x ». Сумма моментов относительно точки O должна быть равна нулю:

$$\begin{aligned} \Sigma M_O = 0 \quad (8). \\ F_{\Sigma \Gamma+D}(4,175 - x) - F_{\Sigma_{KY}}(4,150 - x) + F_{KX} \cdot 2,4 + \\ + F_{PK}(8,3 - x) - F_{PK} \cdot x = 0; \\ x = 4,643 \text{ м}. \end{aligned}$$

Вектор тяги энергетического устройства должен располагаться на расстоянии x от центральной линии левых колёс, то есть в точке O' .

Силу тяжести одного участка цепи примем 50 Н. Следовательно, усилие воздействия на правую поддерживающую планку на участке ковша №2 (9):

$$F_w = 51 + 50 = 101 \text{ Н}.$$

Допустим, внутренний диаметр гидроцилиндра поддержки правой поддерживающей планки №2 $d = 16 \text{ мм}$. Тогда номинальное давление в гидропневмоаккумуляторе управления правыми поддерживающими планками (10): $p = \frac{4 \cdot 101}{3,14 \cdot 16^2} = 0,5 \text{ МПа}$.

Соответственно, номинальное давление в гидропневмоаккумуляторе управления левыми поддерживающими планками $p = \frac{4 \cdot 292}{3,14 \cdot 25^2} = 0,595 \text{ МПа}$.

Внутренние диаметры других гидроцилиндров поддержки правых и левых поддерживающих планок определим по формуле 11 (таблица 2).

Силы сопротивления грунта внедрению рабочих органов при разработке песчаного или супесчаного грунта существенно отличаются от сил сопротивления грунта внедрению рабочих органов при разработке глинистого и суглинистого грунта. Чтобы движение агрегата было прямолинейным, вектор тяги энергетического устройства необходимо корректировать в соответствии с изменением свойств грунта. Для этого на рабочей части агрегата 4 (см. рисунок 2) следует установить плиту 1 с горизонтальным углублением «ласточкин хвост». На раскосах навески 2 энергетического устройства 3 необходимо установить рамку, входящую в углубление плиты.

Чтобы автоматически корректировать вектор тяги энергетического устройства 1 (рисунок 3) по горизонтали в соответствии с изменением свойств грунта перемещением рамки 10 навески энергетического устройства по плите 11, приваренной к средней раме 12 рабочей части агрегата, установлены гидроцилиндры управления рамкой 14. К раме энергетического устройства посредством вала навески 15,

шарниров 5 присоединены внешние штанги 4 с датчиками 6. Внутренние штанги 7 посредством шарниров 9 присоединены к рамке и входят во внешние штанги. Между внешними штангами и внутренними штангами установлены пружины 8.

Если агрегат движется прямо и сопротивление левой и правой стороны рабочей части агрегата приблизительно одинаковое, давление на правую и левую сторону рамки одинаковое. Пружины не сжаты. Предположим, локальные свойства грунта по ширине агрегата изменились так, что сопротивление левой

стороны рабочей части агрегата увеличилось. Левая, по ходу агрегата, пружина сжимается, воздействуя на соответствующий датчик. Сигнал от левого датчика поступает в блок управления и сигнализации, который даёт команду на подачу рабочей жидкости в подпоршневую полость правого гидроцилиндра управления рамкой и штоковую полость левого гидроцилиндра управления рамкой. Происходит смещение влево рамки относительно плиты. Одновременно блок управления и сигнализации выдаёт команду вариатору привода левой гусеницы энергетического устройства умень-

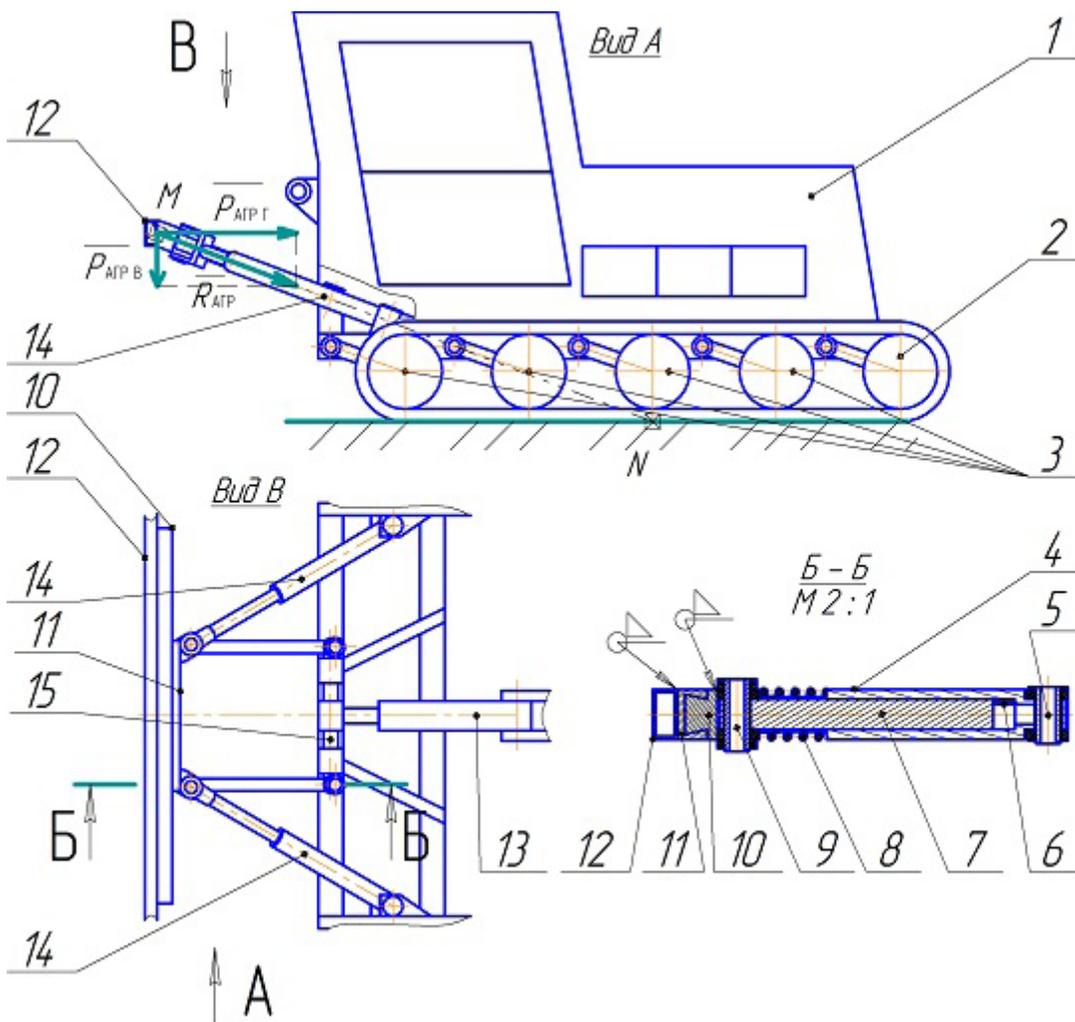


Рисунок 3 – Навеска энергетического устройства: 1 – энергетическое устройство; 2 – ведущая звёздочка; 3 – каток; 4 – внешняя штанга; 5, 9 – шарнир; 6 – датчик; 7 – внутренняя штанга; 8 – пружина; 10 – рамка; 11 – плита; 12 – средняя рама; 13 – гидроцилиндр управления навеской; 14 – гидроцилиндр управления рамкой; 15 – вал навески

Figure 3 – Attachment of the energy device: 1 – energy device; 2 – leading asterisk; 3 – skating rink; 4 – external barbell; 5, 9 – hinge; 6 – sensor; 7 – inner barbell; 8 – spring; 10 – frame; 11 – plate; 12 – middle frame; 13 – hydraulic cylinder of hinged control; 14 – hydraulic frame control cylinder; 15 – shaft of the hinged

шить угловую скорость относительно привода правой гусеницы энергетического устройства. Это, во-первых, способствует уменьшению трения при смещении рамки относительно плиты, во-вторых, создаёт плавный поворот энергетического устройства влево. При этом левая, по ходу агрегата, пружина разжимается и прекращается воздействие на датчик.

Когда смещение влево рамки относительно плиты прекращается, блок управления и сигнализации выдаёт команду вариатору привода левой гусеницы энергетического устройства увеличить угловую скорость относительно привода правой гусеницы энергетического устройства. Происходит плавный поворот энергетического устройства вправо до выравнивания энергетического устройства относительно рабочей части агрегата. Если сопротивление правой стороны рабочей части агрегата увеличилось, в блок управления и сигнализации поступает сигнал от правого датчика. Так происходит автоматическая корректировка вектора тяги энергетического устройства по горизонтали относительно суммарного вектора сопротивления рабочей части агрегата.

Если сопротивление рабочей части агрегата увеличилось более установленного, например, при встрече с крупным камнем, сжимаются обе пружины, сигнал в блок управления и сигнализации поступает от правого и левого датчика. Блок управления и сигнализации выдаёт команду остановки энергетического устройства и гидромоторов. Энергетическое устройство и гидромоторы возобновляют движение после выявления оператором причины остановки агрегата. Так осуществляется защита агрегата от повреждений.

Чтобы нагрузка на ведущие звёздочки 2 и катки 3 (см. рисунок 3) энергетического устройства была равномерной по длине гусениц, нужно, чтобы центр масс энергетического устройства совпадал с точкой N середины обеих гусениц, а штанги навески, в период стабильной работы агрегата, были направлены по линии NM . Приложим к точке M горизонтальную силу [27]. Направим силу сопротивления рабочей части агрегата по линии NM . Тогда, из рисунка 3, вертикальная составляющая сопротивления рабочей части агрегата, a . Вертикальная составляющая показывает, что часть силы тяжести рабочей части агрегата передаётся на энергетическое устройство, уменьшая нагрузку на опорные колёса рабочей части агрегата и увеличивая сцепной вес энергетического устройства.

Перед началом разработки грунта оператор на блоке управления и сигнализации устанавливает один из двух режимов работы: свободный или с автогоризонталью. Если установлен свободный режим работы, рабочая часть агрегата посредством опорных колёс копирует рельеф. Одновременно каждый ковш копирует микронеровности рельефа, так как ролики воздействуют на цепи сверху посредством давления в гидроцилиндрах роликов, связанных с гидропневмоаккумулятором управления роликами. Снизу на цепи воздействуют поддерживающие планки посредством давления в гидроцилиндрах правой и левой поддерживающих планок, связанных с гидропневмоаккумуляторами управления поддерживающими планками. Изменяя давления в гидропневмоаккумуляторе управления роликами и гидропневмоаккумуляторах управления поддерживающими планками, оператор может регулировать степень точности копирования микронеровностей рельефа. Полости гидроцилиндра управления навеской 13 (см. рисунок 3) сообщаются между собой, рабочая жидкость свободно перетекает из подпоршневой полости в штоковую полость и обратно, позволяя рабочей части агрегата изменять положение по вертикали относительно энергетического устройства.

Если установлен режим работы с автогоризонталью, рабочая часть агрегата не копирует рельеф, а расположена строго горизонтально. Путём автоматического регулирования давления в гидропневмоаккумуляторах управления опорными колёсами осуществляется распределение вертикальных усилий на опорные колёса для поддержания горизонтального положения рабочей части агрегата. Одновременно блок управления и сигнализации регулирует давление в гидроцилиндрах автогоризонтальности для выравнивания корпуса энергетического устройства относительно рабочей части агрегата в поперечно-вертикальной плоскости путём перемещения по вертикали гидроцилиндрами автогоризонтальности катков и ведущих звёздочек правой и левой гусеницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых теоретических исследований выявлены диаметры гидроцилиндров поддержки и номинальное давление в гидропневмоаккумуляторах управления правыми и левыми поддерживающими планками. Дан пример расчёта положения вектора тяги энергетического устройства. Предложена конструктивная компоновка системы автоматиче-

ской корректировки положения вектора тяги энергетического устройства в зависимости от свойств разрабатываемого грунта и общая компоновка энергетического устройства. Проведённые теоретические исследования позволяют обеспечить устойчивость перемещения ковшей и направления движения агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // *Строительные и дорожные машины*. 2008. №4. С. 36–42.
2. Карнаухов А.И., Орловский С.Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // *Строительные и дорожные машины*. 2010. №1. С. 20–22.
3. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // *Строительные и дорожные машины*. 2010. №5. С. 47–49.
4. 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.
5. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // *Строительные и дорожные машины*. 2010. №11. С. 34–38.
6. Вершинин А.В., Зубов В.С., Тюльнев А.М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // *Строительные и дорожные машины*. 2012. №8. С. 42–44.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // *Cold Regions Science and Technology*. 2013. Vol. 86. P. 142-166.
11. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // *Rock and Soil Mechanics*. 2005. №8. P. 150-163.
12. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // *Advances in Earth Science*. 2006. №12. P. 96-103.
13. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007. 448 p.
14. 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.
15. Нилов В.А., Фёдоров Е.В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // *Строительные и дорожные машины*. 2016. №2. С. 7–10.
16. Чмиль В.П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // *Строительные и дорожные машины*. 2016. №11. С. 18–20.
17. 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.
18. Сёмкин Д.С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // *Вестник СибАДИ*. 2017. №1. С. 37–43.
19. Константинов Ю.В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. №5. С. 31–39.
20. 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.
21. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. №1. С. 47–54.
22. 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.
23. 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.
24. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2020. №2. С. 172–181.
25. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // *Вестник СибАДИ*. 2020. №6. С. 676–688.

REFERENCES

1. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchytom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction] *Construction and road machinery*, 2008. 4: 36-42. (In Russian)
2. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zhatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevyimi frezami [Determination of the cost of specific energy for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*, 2010. 1: 20-22. (In Russian)

3. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoy glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezo [Determination of the critical cutting depth for combined cutting of soils with a hydrophreeze]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)
4. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the time distribution of traction force for multi-cutter working bodies of earthmoving machines]. *Construction and road machinery*, 2010. 11: 44-48. (In Russian)
5. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Effect of soil friction on the knife surface on the cutting resistance]. *Construction and road machinery*, 2010. 11: 34-38. (In Russian)
6. 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)
7. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistances in the development of soils with a ripper according to the integral strength index]. *Construction and road machines*, 2005. 3: 38-40. (In Russian)
8. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003. 36: 115-128.
9. 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.
10. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013. 86: 142-166.
11. 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.
12. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006. 12: 96-103.
13. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007: 448.
14. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemykh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnykh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*, 2017. 2: 12-15.
15. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Development of the soil with a scraper in the conditions of free cutting]. *Construction and road machines*, 2016. 2: 7-10.
16. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskimi vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016. 11: 18-20.
17. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskimi davleniyami [Experimental studies of the process of soil digging by rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016. 4: 23-28. (In Russian)
18. Syomkin D.S. O vliyanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of the resistance to cutting the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 1: 37-43. (In Russian)
19. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method of calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*, 2019. 5: 31-39. (In Russian)
20. 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 composition of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 5: 32-39. (In Russian)
21. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 1: 47-54. (In Russian)
22. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *Tractors and agricultural machines*, 2017. 7: 13-19. (In Russian)
23. Nikolayev V.A. Opredelenie skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilayushchego sloya avtodorogi [Determination of the speed of the chains and the size of the soil layer cut 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)
24. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 2: 172-181. (In Russian)
25. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstviya dlja formirovaniya podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 6: 676-688. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» ORCID: 0000-7503-6612 (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88 , ORCID: 0000-7503-6612, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

УДК 656

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389>

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯРНОГО ГОРОДСКОГО МАРШРУТА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОБУСА

А.Д. Горбунова, О.Ю. Смирнова
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен анализ научных работ по эксплуатации безрельсовых транспортных средств общего пользования с электрическим приводом. Электробусы прошли тестирование в крупных мегаполисах, и, несмотря на преимущества, были выявлены проблемы в выборе типа зарядки, технологических особенностей и с наличием и эксплуатацией зарядной инфраструктуры. Процесс эксплуатации сопровождается рядом технических ограничений, которые на практике затрудняют выбор маршрутов для эксплуатации электробусов. Целью исследования является разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов и проверка его на примере маршрутной сети г. Тюмени.

Материалы и методы. Сформирована структурно-логическая схема факторов, влияющих на выбор маршрута для эксплуатации электробуса. В результате обработки экспертных оценок выявлены наиболее существенные факторы. На основе теории системного анализа выявлена схема взаимосвязей данных факторов, сформулированы ограничения для алгоритма. Разработан алгоритм выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса, на основе которого построена имитационная модель.

Результаты. Сформирована схема факторов, оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса с учетом их взаимных связей. Разработан алгоритм и имитационная модель выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса. Выполнена оценка нескольких городских маршрутов в г. Тюмени на предмет рациональности ввода электробусов.

Обсуждение и заключение. Оценка пяти регулярных городских маршрутов в г. Тюмени с помощью разработанного алгоритма и имитационной модели позволила выявить три рациональных маршрута, а также показала нерациональность двух других, что было обусловлено несоответствием продолжительности зарядной сессии и перерывов в работе и недостаточным уровнем заряда тяговой аккумуляторной батареи для обеспечения требуемого автономного хода транспортного средства. В ходе продолжения данных исследований будет разработан дополнительно алгоритм экономической оценки маршрутов для эксплуатации электробусов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электробус, зарядная станция, рациональный регулярный городской маршрут, зарядная инфраструктура, выбор маршрута, алгоритм.

Поступила 08.07.21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Горбунова, А.Д. Разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса / А.Д. Горбунова, О.Ю. Смирнова. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 378-389.

© Горбунова А.Д., Смирнова О.Ю., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389>

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR SELECTING A RATIONAL REGULAR URBAN ROUTE FOR ELECTRIC BUS OPERATION

Anastasia D. Gorbunova, Olga Yu. Smirnova
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article presents an analysis of researches on the operation of public transport vehicles with an electric drive. Electric buses have been tested in megacities, and despite the advantages, problems were identified both in the selection of the charging type, technological features and with the availability and operation of the charging infrastructure. The operation process is associated with a number of technical restrictions, which in practice make it difficult to select routes for the electric bus operation. The aim of the study is to develop an algorithm for selecting a rational regular urban route for the electric bus operation and to test it on the example of the route network of Tyumen.

Materials and methods. A structural diagram of the factors influencing the selection of the route for the electric bus operation has been formed. As a result of processing expert assessments, the most significant factors were identified. The diagram of the interconnections of these factors is identified and limitations for the algorithm are formulated based on the theory of systems analysis. The algorithm for selecting the rational regular urban route for the electric bus operation has been developed. It enables creating the simulation model for selecting a rational regular urban route for the operation of an electric bus.

Results. The diagram of factors influencing the selection of a rational regular urban route for the operation of an electric bus, taking into account their mutual relations, has been formed. The algorithm and simulation model for selecting a rational regular urban route for the operation of an electric bus has been developed. Several urban routes in Tyumen were assessed for the rationality of the introduction of electric buses.

Discussion and conclusions. Evaluation of five regular urban routes in Tyumen using the developed algorithm and the simulation model revealed three rational routes, and also showed the inefficiency of the other two. It due to the discrepancy between the duration of the charging session and breaks in operation, as well as the insufficient charge level of the traction battery to ensure the required autonomous movement of the vehicle. In the course of the continuation of these studies, the developed algorithm will be supplemented with the stage of economic assessment of routes for the operation of electric buses.

KEYWORDS: electric bus, charging station, rational regular urban route, charging infrastructure, selection of route, algorithm

Submitted 08.07.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Gorbunova A.D., Smirnova O.Yu. Development of the algorithm for selecting a rational regular urban route for electric bus operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 378-389. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389>.

© Gorbunova A.D., Smirnova O.Yu., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Повышение экологичности транспортных средств является одним из направлений развития автотранспортной отрасли, что отражено в транспортной стратегии РФ на период до 2030 г. и в стратегии развития автомобильной промышленности РФ на период до 2025 г. При этом в качестве мирового тренда, который оказывает существенное влияние на выбор вида используемого топлива и энергии для движения, рассматривается электрический двигатель. В мире численность электрических транспортных средств на конец 2020 г. превысила 10 млн ед. А согласно прогнозам аналитических агентств к 2030 г. данный парк может достигнуть 145 млн ед.

Активный ввод в эксплуатацию транспортных средств на электрической тяге наблюдается не только на уровне индивидуального транспорта, но и активно используется на общественном. Так, согласно отчету аналитического агентства Bloomberg, на конец 2018 г. численность электробусов в мире превысила 450 тыс. ед., а к 2025 г. их количество должно вырасти до 630 тыс. ед. В Российской Федерации в крупнейших городах, а именно в г. Москве и в г. Санкт-Петербурге, активно вводятся в эксплуатацию электробусы. К концу 2020 г. численность электробусов, обслуживающих население на 45 регулярных городских маршрутах, в г. Москве достигла 605 ед.

Эксплуатация электрических транспортных средств на маршруте способствует повышению экологичности подвижного состава. Согласно социальному стандарту транспортного обслуживания населения автомобильным и наземным электрическим транспортным экологический класс транспортных средств является показателем качества транспортного обслуживания. Это обуславливает необходимость распространения электробусов. Однако современные транспортные средства на электрической тяге имеют ряд технических ограничений: запас хода, продолжительность восстановления заряда тяговой аккумуляторной батареи, изменение данных параметров при понижении температуры окружающего воздуха. Это одновременно с их высокой стоимостью и отсутствием зарядной инфраструктуры приводит к снижению темпов распространения в регионах. По состоянию на июнь 2021 г. данные транспортные средства эксплуатируются в регионах в ограниченном количестве, как правило 1-2 электробуса в одном

городе. При этом эксперты отмечают сложность выбора рационального маршрута на практике с учетом технических и технологических ограничений данных транспортных средств.

Современные исследования, рассматривающие эксплуатацию электробусов, как правило, направлены на подбор зарядной инфраструктуры для данных транспортных средств в соответствии с особенностями маршрута (скорость движения, количество остановочных пунктов и время простоя на них, длина перегонов, количество поворотов, загрузка транспортных средств, уклон дороги и др.) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]; изучение мер стимулирования для эксплуатации электробусов [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]; разработку ездового цикла, способствующего снижению расхода электроэнергии из тяговой батареи, а также выбор режима эксплуатации тяговой аккумуляторной батареи для увеличения ее ресурса¹ [20].

Влияние зарядной инфраструктуры на функционирование электробусов рассматривается как одна из наиболее важных составляющих при их эксплуатации, что обусловлено техническими ограничениями данных транспортных средств. Её рациональное планирование способствует снижению затрат на электроэнергию и отсутствию сбоев в их работе, что может быть связано со значительной продолжительностью восстановления заряда тяговой батареи [1]. Вероятность снижения частоты обслуживания населения при эксплуатации электробусов отмечена в работах [2, 3]. Подбор зарядной инфраструктуры, как правило, осуществляется в несколько этапов: исследование особенностей функционирования транспортных средств на маршруте и оценка потребления энергии; проверка технической реализуемости архитектур и определения размеров бортового хранилища; сравнение реализуемых решений с экономической точки зрения [1]. В качестве важных факторов, оказывающих влияние на количество потребленной энергии при движении по маршруту, авторы [1] выделяют коэффициент загрузки автобуса, его среднюю скорость и средний уклон дороги. Однако Fusco G., Alessandrini A. и др. отмечают существенное влияние на расход электрической энергии на маршруте: его длину, частоту движения транспортных средств, а также время простоя на промежуточных и конечных остановочных пунктах [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Данные закономерности разрабатываются и позволяют оценить суммарное количество энергопотребления в городах при переходе к

¹ Назаров А.А. Разработка комплекса мероприятий по совершенствованию функционирования городских автобусов на основе учета сложности маршрута движения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Андрей Анатольевич Назаров. М., 2006.

эксплуатации электробусов на одном отдельном маршруте либо в целом в городе [8, 9]. Но не рассматривают подходы, направленные на увеличение численности парка электробусов, а соответственно, рост количества обслуживаемых городских маршрутов. Данные методы представлены в работах [10, 11, 12]. В этом случае авторы отмечают важность четкости стратегического планирования и эффективности взаимодействия компаний перевозчиков и органов местного самоуправления при принятии решений по эксплуатации электробусов. Однако подобные исследования рассматривают только социально-экономические методы регулирования без учета технической возможности реализации мероприятий. Проблемы поэтапного перехода к эксплуатации электробусов представлены в работах [13, 14, 15, 16]. Их решение основывается на разработке программ смешанно-целочисленного моделирования, многоцелевой оптимизации и методах аналитического иерархического процесса с учетом минимизации затрат, возникающих при эксплуатации электробусов. При этом авторы учитывают не только технические характеристики транспортных средств, но и соответствие расписанию движения на маршруте.

Важность поэтапного перехода к эксплуатации электробусов отмечена в работах [17, 18, 19]. Это обусловлено высокими капитальными затратами на организацию зарядной инфраструктуры и покупку электробусов для обслуживания населения по всем существующим маршрутам сети (от 28,5 до 34,1 млн руб. при обслуживании маршрута протяженностью 10 км одним электробусом). В этом случае возникает необходимость выбора рационального маршрута для эксплуатации электробуса с учетом всех существующих его ограничений: наличия свободных парковочных мест для стоянки транспортных средств во время зарядной сессии, особенностей расписания движения автобусов и режима труда и отдыха водителей, параметров маршрута и др. В настоящее время Krawiec K. предложил иерархическую модель развертывания парка электробусов, которая рассматривает выбор маршрута для поэтапного ввода электробусов [17]. Она основывается на модели графов сети общественного транспорта, существующего расписания и модели состояния батарей электробуса, рассматривающих

потребление энергии с помощью линейной модели, заданной однозначно. Однако согласно работ [20] данная величина зависит от множества факторов, из которых существенное влияние оказывает скорость движения, время простоя на промежуточных остановочных пунктах, их количество, загрузка транспортного средства. При этом организация зарядной инфраструктуры требует наличия свободной территории для организации парковочного места автобуса во время зарядной сессии, что может оказать существенное влияние на выбор маршрута для эксплуатации электробуса в крупном городе с плотной застройкой. Это обуславливает необходимость расширения данной области исследования. Целью исследования является разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов и его проверка на примере маршрутной сети г. Тюмени.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выявить существенно важные факторы, которые будут включены в алгоритм;
- выявить и сформулировать ограничения, возникающие в ходе эксплуатации электробуса на регулярном городском маршруте;
- разработать алгоритм выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса;
- выполнить верификацию разработанного алгоритма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе анализа ранее выполненных работ было установлено, что существующие подходы к выбору маршрута электробуса не учитывают полного перечня факторов, влияющих на эксплуатацию данных транспортных средств. Данный перечень был составлен на основе анализа работ, которые были представлены ранее [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], а также дополнительного изучения исследований, направленных на рациональное распределение подвижного состава по маршрутной сети. В результате в качестве факторов, которые выделяют авторы работ^{2,3}, были выявлены количество поворотов, светофоров на маршруте, наличие повышенных требований к экологичности транспортных средств, взаимное наложение маршрутов.

²Черняева В.А. Комплексное обоснование выбора систем городского пассажирского общественного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Виктория Андреевна Черняева. СПб., 2014.

³Фомин Е.В. Повышение качества обслуживания пассажиров городского транспорта путем оптимизации структуры парка подвижного состава: автореф. дис. ...канд. техн. наук/ Евгений Валерьевич Фомин. Красноярск., 2018.

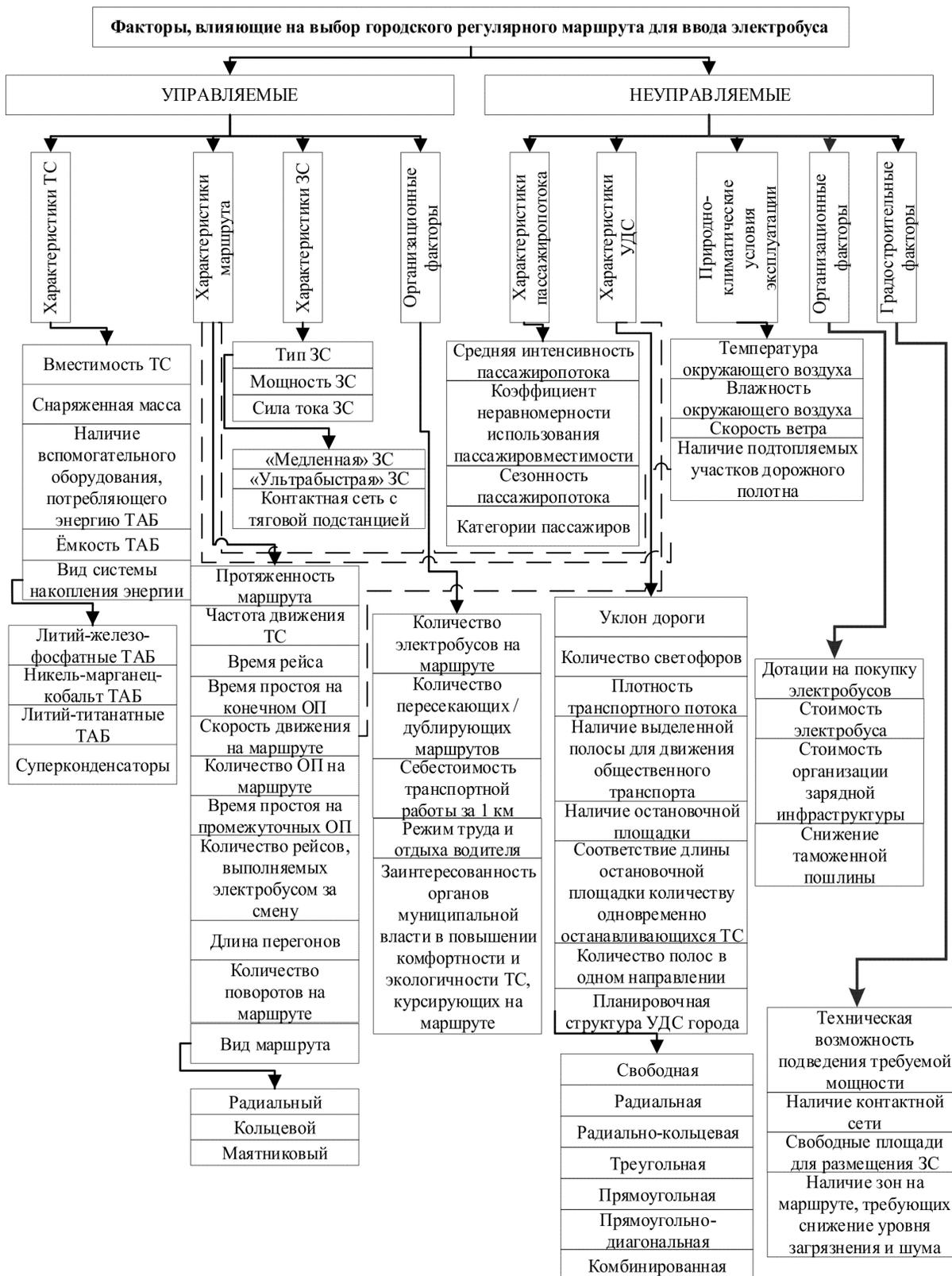


Рисунок 1 – Структурная схема факторов, влияющих на выбор регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 1 – Structural diagram of factors influencing on the selection of a regular urban route for an electric bus operation

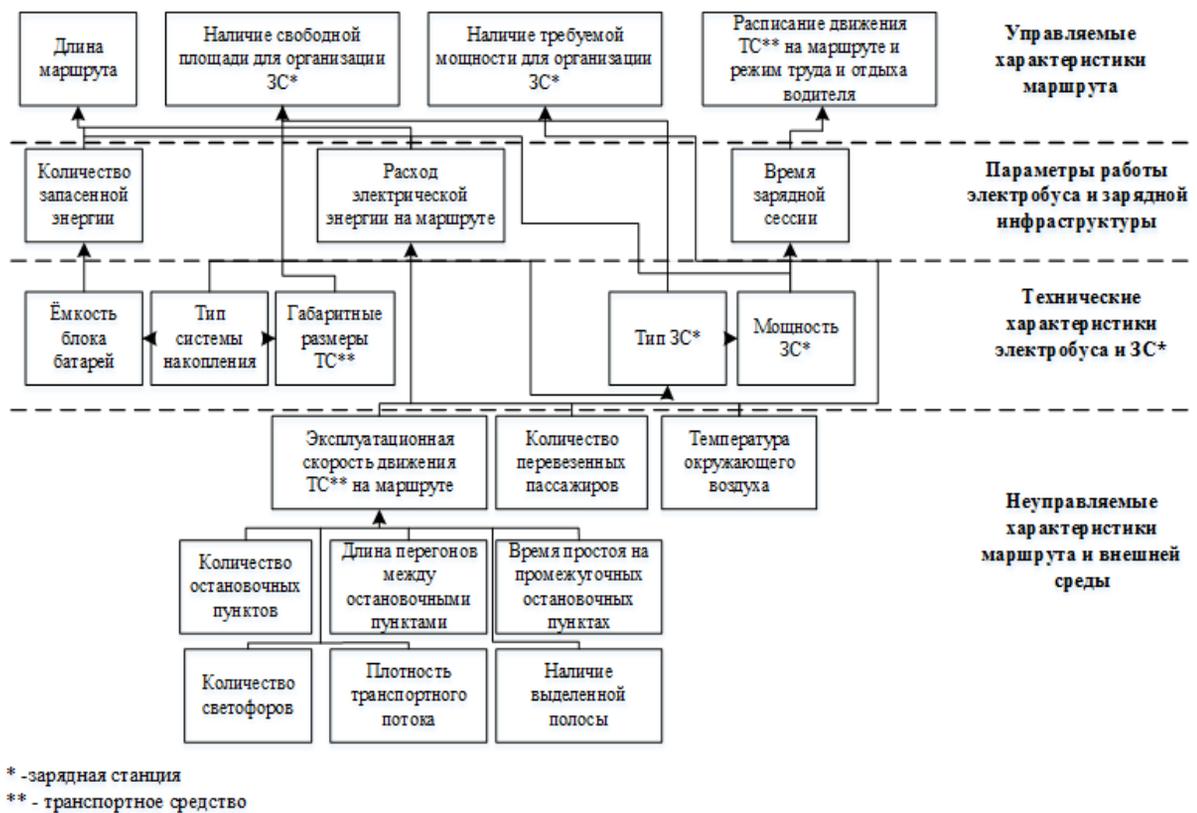


Рисунок 2 – Схема взаимного влияния факторов на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 2 – Diagram of the mutual influence of factors on the selection of a rational regular urban route for an electric bus operation

Поэтому первоначально в ходе проведения исследования была разработана структурная схема факторов, оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса, что представлено на рисунке 1.

В результате экспертной оценки предложено более 40 факторов, были выбраны наиболее весомые из них и составлена схема их взаимосвязей, которая представлена на рисунке 2.

Выбор рационального маршрута с учетом данных факторов требует формулировки некоторых ограничений, в частности расстояние автономного пробега строго ограничено емкостью тяговой аккумуляторной батареи и расходом электрической энергии. Поэтому для разработки ограничений были дополнительно изучены и проанализированы нормативно-правовые акты в области организации пассажирских перевозок автомобильным транспортом, а также исследования, рассматривающие эксплуатацию электрических транспортных средств.

Одним из основных ограничений, оказывающих влияние на выбор рационального маршрута для эксплуатации электробуса, является наличие свободных парковочных мест, позволяющих организовать место для отстоя транспортных средств во время заряда тяговой аккумуляторной батареи. Это обусловлено тем, что электробус во время зарядной сессии, продолжительность которой может составлять от 6 до 20 мин в среднем, не должен препятствовать движению и остановке для посадки и высадки пассажиров других транспортных средств. Согласно своду правил «Требования к элементам улично-дорожной сети населенных пунктов» (2018 г.) площадь одного парковочного места для автобуса должна составлять от 72 до 118 м² в зависимости от способа его организации.

Технические характеристики электробусов и особенности их эксплуатации также оказывают влияние на выбор рационального маршрута. В этом случае основным ограничением является емкость тяговой аккумуляторной батареи, которая может изменяться от 15 до 250 кВт*ч [21].

Таблица 1
Ограничения в алгоритме выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Table 1
Limitations in the algorithm for selecting a rational regular urban route for an electric bus operation

№п/п	Ограничения
1	График движения автобусов остается неизменным при эксплуатации электробусов
2	Сохранение режима труда и отдыха водителей при эксплуатации электробусов
3	Наличие парковочного места площадью от 72 до 118 м ² для отстоя электробусов во время зарядной сессии
4	Изменение заряда тяговой батареи во время движения электробуса по маршруту должно находиться в диапазоне от 30 до 80%. При этом для выполнения зарядной сессии, способствующей ресурсосбережению тяговой аккумуляторной батареи, уровень заряда тяговой аккумуляторной батареи для следующей зарядной сессии не должен превышать 60%
5	При выезде с транспортного предприятия заряд тяговой аккумуляторной батареи составляет 100%

Однако данное значение не является предельной величиной, так как их полный разряд приводит к снижению ресурса их эксплуатации. В работе И. К. Масленникова⁴ экспериментальным путем установлено, что для сохранения ресурса тяговых аккумуляторных батарей уровень заряда их следует поддерживать в диапазоне от 30 до 80%. Однако верхнее значение данного диапазона соответствует желаемому максимальному уровню заряда батареи на маршруте. При дальнейшем движении по маршруту данное значение должно снижаться и для выполнения зарядной сессии, при которой температура нагрева тяговой аккумуляторной батареи не превышала допустимых значений, уровень заряда тяговой батареи не должен превышать 60%. При этом данная емкость аккумуляторной батареи должна обеспечивать такой автономный пробег транспортного средства, чтобы соответствовать расписанию движения автобусов на маршруте с учетом требований по режиму труда и отдыха водителей. Это является еще одним из ограничений при выборе рационального маршрута для эксплуатации электробуса. Согласно приказу Минтранса России от 16.10.2020 №424 время непрерывного управления транспортным средством должно ограничиваться 4 ч 30 мин, по окончании данного времени следует делать перерыв не менее 45 мин. Данный перерыв может быть разделен на несколько, при этом каждая часть не должна составлять менее 10 мин. Эти специальные перерывы могут быть использованы в качестве времени заряда тяговых аккумуляторных батарей так же, как и

перерыв для отдыха и питания, который должен составлять от 30 мин до 2 ч в середины смены. Данные перерывы могут быть использованы только в том случае, если продолжительность зарядной сессии не превышает его длительность. Данные ограничения обусловлены тем, что при эксплуатации электробуса на маршруте организация дополнительных перерывов для восстановления заряда тяговых аккумуляторных батарей или увеличение продолжительности специальных перерывов может привести к изменению частоты обслуживания населения, что также является одним из показателей качества оказываемых услуг. Все ограничения, сформулированные в ходе разработки алгоритма, представлены в таблице 1.

График движения транспортных средств и режим труда и отдыха водителей в алгоритме авторами предложено учитывать как совокупность блоков «движение-перерыв». Их количество в расписании будет задавать численность циклов в расчете. При этом факторы, оказывающие влияние на расход электроэнергии электробусом на маршруте, были сгруппированы по природе их воздействия, а именно такие факторы, как количество остановочных пунктов, время простоя на них и длина перегонов между ними учтены в эксплуатационной скорости движения транспортных средств на маршруте. Расположение зарядных станций на маршруте учитывается с помощью измерения расстояния между ними и расчетного количества энергии, требуемого для преодоления его и основанного на измерении нормы расхода электрической энергии на маршруте.

⁴ Масленников И.К., Карпунин К.Е., Климов А.В., Оспанбеков Б.К. Исследование эксплуатационных показателей тягового электрооборудования электробуса в городских условиях движения // Сборник трудов конференции «Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем». НАМИ. 2019. С. 377–384.

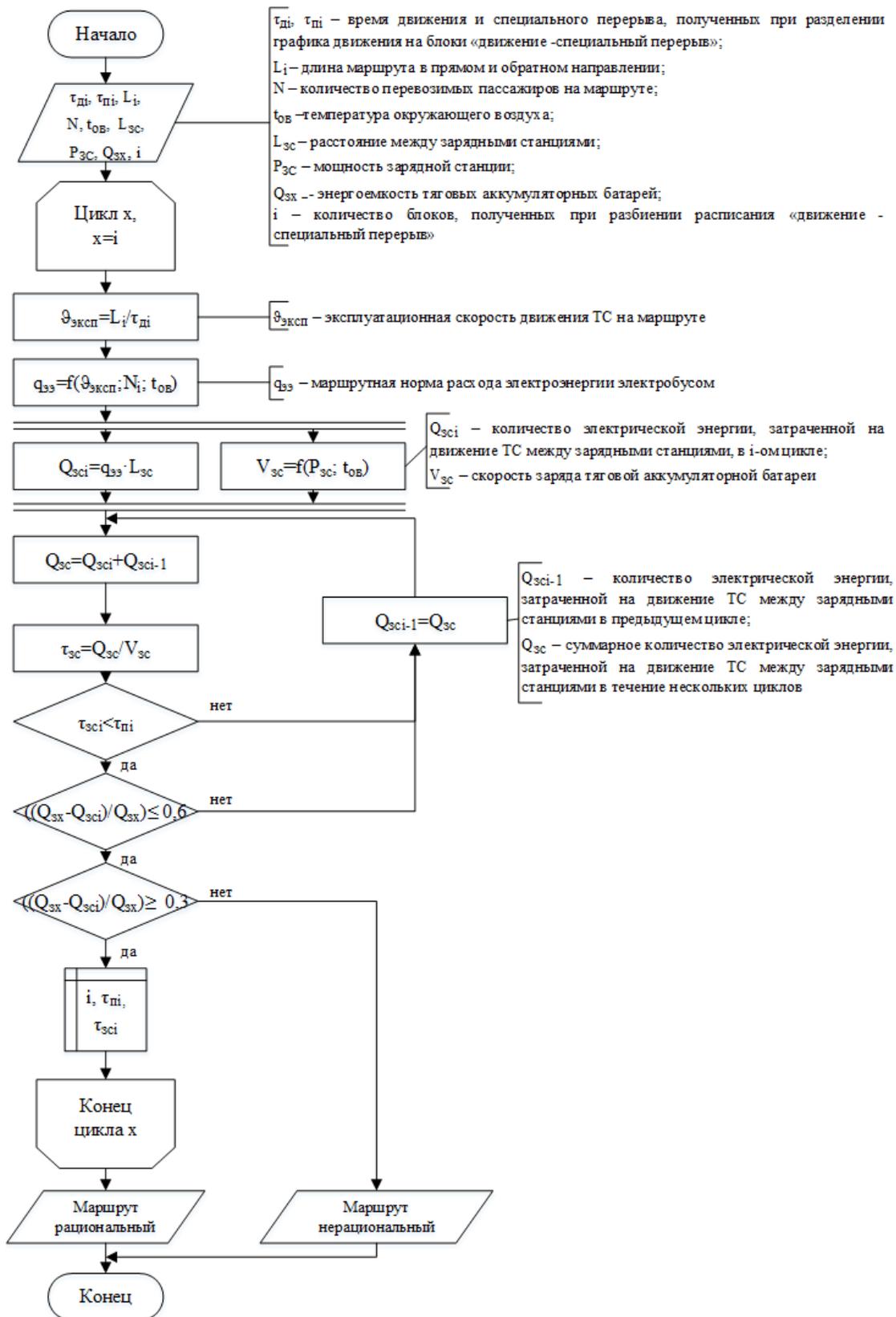


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 3 – The algorithm for selecting a rational urban regular route for an electric bus operation

Норма расхода электроэнергии на маршруте – это значение, которое будет получено в результате расчета разработанных закономерностей, учитывающих эксплуатационную скорость движения транспортных средств, количество перевезенных пассажиров и температуру окружающего воздуха, и функций распределения, описывающих вероятностный характер данного значения. Увеличение количества перевезенных пассажиров на маршруте и снижение температуры воздуха приводит к увеличению расхода электроэнергии электробусом из тяговой аккумуляторной батареи, и, следовательно, приводит к увеличению количества зарядных сессий и времени простоя для восстановления заряда тяговых аккумуляторных батарей. Данные факторы также будут увеличивать и время зарядной сессии, которое в алгоритме учитывается в результате расчета скорости заряда тяговых аккумуляторных батарей, дополнительно зависящей от мощности зарядных станций. Данная величина будет оказывать влияние на время зарядной сессии. В результате несоответствия продолжительности зарядной сессии и перерывов количество запасенной энергии сохраняется и в следующем цикле уменьшается на то количество энергии, которое затрачивается на преодоление расстояния до зарядной станции в следующем цикле.

Разработанный алгоритм (рисунок 3) является основой для имитационной модели выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов, разработанной в программе Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки разработанного алгоритма были выбраны 5 маршрутов в г. Тюмени с различной длиной маршрута и возможностью организации зарядных станций. Схема данных маршрутов на карте г. Тюмени представлена на рисунке 4.

Три из представленных маршрутов являются маятниковыми, но имеют только одну стоянку для отстоя транспортных средств во время зарядной сессии. Они соединяют несколько административных округов и пролегают через центральную часть г. Тюмени. Остальные маршруты являются кольцевыми. При этом один из них связывает различные социальные учреждения и имеет участок маршрута, проходящий через центральную магистраль города. Другой маршрут пролегает через кольцевую дорогу и обслуживает население в труднодоступных транспортных районах города. Фрагмент исходных данных маршрутов и электробуса, осуществляющего транспортное обслуживание и результаты оценки, представлены в таблице 2.

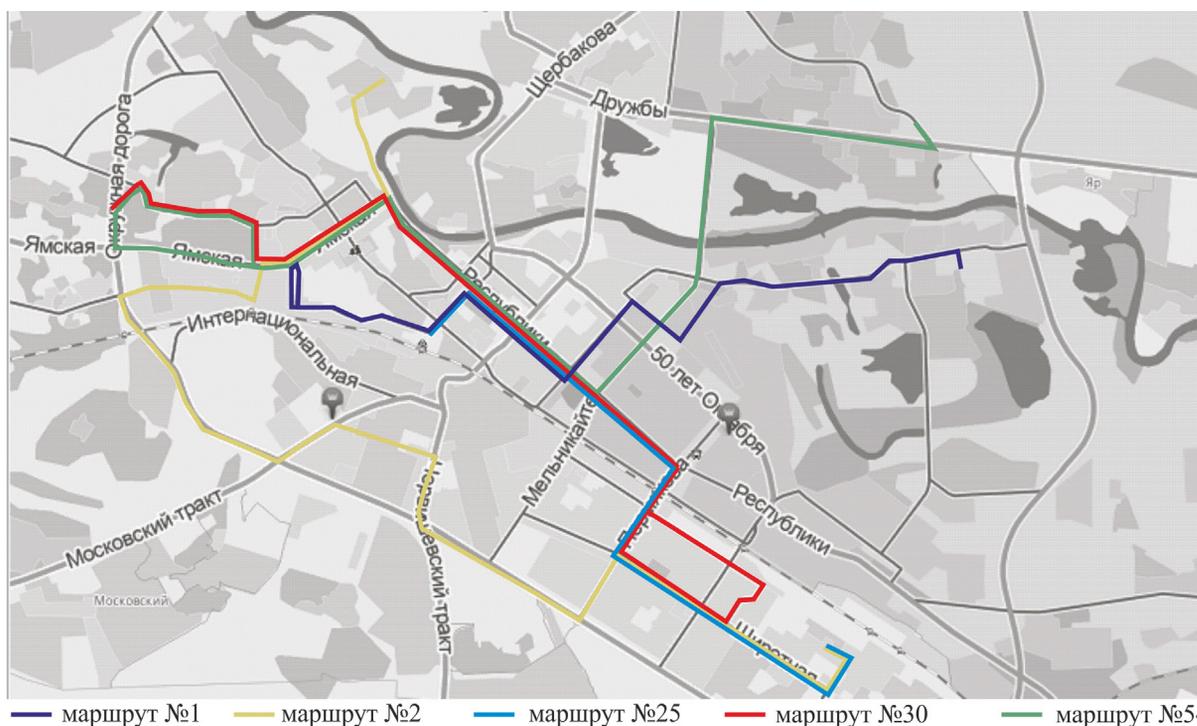


Рисунок 4 – Схема маршрутов, проанализированных с помощью алгоритма

Fig. 4 – Scheme of routes analyzed by the algorithm

Таблица 2
Характеристики маршрутов и результаты оценки для эксплуатации электробуса

Table 2
Route characteristics and assessment results for an electric bus operation

Характеристики	№ маршрута				
	1	2	25	30	54
Время движения, мин	121	181	57	130	149
Время перерыва, мин	18	39	14	10	47
Время движения, мин	123	208	56	129	150
Время перерыва, мин	65	64	39	39	25
Время движения, мин	121	176	105	125	145
Тип маршрута	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*	кольцевой с одним парковочным местом для ЗС*	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*	кольцевой с одним парковочным местом для ЗС*	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*
Расстояние между зарядными станциями, км	30	53	28	35	44
Мощность зарядной станции, кВт	50	50	50	50	50
Энергоемкость блока батарей, кВт*ч	127	127	127	127	127
Рассчитываемое количество циклов	3	3	3	3	3
Результат оценки маршрута для эксплуатации электробуса	рациональный	нерациональный	рациональный	рациональный	нерациональный

*- зарядная станция

В результате расчета с помощью имитационной модели данных маршрутов было выявлено, что три из представленных маршрутов являются рациональными и технически возможно ввести в эксплуатацию электробусы на маршрутах № 25, 30 и 1. А два из выбранных маршрутов не удовлетворяют ограничениям по соответствию продолжительности заряда тяговых аккумуляторных батарей и перерывов, а также по количеству энергии, сохраненной в тяговой аккумуляторной батарее в результате совершения автономного пробега. Разработанный алгоритм и на его основе имитационная модель могут быть применены для технической оценки рациональности маршрута для эксплуатации электробуса. В дальнейшем выбранные маршруты будут оцениваться по экономическим показателям, а именно доходности маршрута и эксплуатационным затратам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При активном внедрении электробусов возникает проблема выбора рационального маршрута. В ходе анализа ранее выполненных работ и опыта эксплуатации сформулирован исчерпывающий перечень факторов,

оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса. Используя экспертные мнения, выявлены наиболее существенные факторы, для которых составлена схема их взаимного влияния. С учетом анализа ранее проведенных исследований и требований нормативно-правовых актов сформулированы ограничения для разработки алгоритма: по площади парковочного места, отводимого для отстоя транспортных средств; по уровню заряда тяговой аккумуляторной батареи; по режиму труда и отдыха водителей и расписанию движения транспортных средств. Выполнены процедуры проверки разработанного алгоритма на маршрутной сети г. Тюмени.

Авторы предлагают поэтапно определить все маршруты в городе, которым можно присвоить метку «рациональные» для эксплуатации электробусов, а на последующих маршрутах в случае принятия решения по эксплуатации выявить потребность в изменении расписания движения транспортных средств или организации дополнительных парковочных мест для зарядки электробуса.

В ходе продолжения данных исследований будет разработан дополнительно алгоритм экономической оценки маршрутов для эксплуатации электробусов. Это будет способствовать постепенному вводу и распространению электробусов в регионах Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Conti V., Orchi S., Valentini M., Nigro M., Calo R. Design and evaluation of electric solutions for public transport // *Transportation Research Procedia*. 2017. 27: 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.033>
2. Fusco G., Alessandrini A., Colombaroni Ch., Pia Valentini M. A model for transit design with choice of electric charging system // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. 8: 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.607>
3. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis M. Sustainable urban transit network design // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 7: 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
4. Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D. Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2017. 10 (11): 707-720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>
5. De Filippo G., Marano V., Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University // *Applied Energy*. 2014. 11: 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.011>
6. Vepsäläinen J., Kivekäs K., Otto K., Lajunen A., Tammi K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. 63: 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>
7. Basma H., Mansour Ch., Haddad M., Nemer M., Stabat P. Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses // *Energy*. 2020. Vol. 207. Article No. 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
8. Gallet M., Massier T., Hamacher T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks // *Applied Energy*. 2020. 230: 344-356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>
9. Gallet M., Massier T., Zehe D. Developing a Large-Scale Microscopic Model of Electric Public Bus Operation and Charging. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. January 2020. 10: 1-5. 10.1109/VPPC46532.2019.8952361
10. Gabsalikhova L., Sadygova G., Almetova Z. Activities to convert the public transport fleet to electric buses // *Transportation Research Procedia*. 2018. 36: 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>
11. Bezruchonak A. Geographic features of zero-emissions urban mobility: the case of electric buses in Europe and Belarus // *European spatial research and policy*. 2019. 26(1): 81-99. 10.18778/1231-1952.26.1.05
12. Deliali A., Chhan D., Oliver J., Sayess R., Godri Politt K.J., Chritofa E. Transitioning to zeroemission

bus fleets: state of practice of implementations in the United States // *Transport Reviews*. 2021. 41(2): 164-191. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>

13. Pelletier S., Jabali O., Mendoza J.E., Laporte G. The electric bus fleet transition problem // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. 109: 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>
14. Wei R., Liu X., Ou Y., Kiavash Fayyaz S. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system // *Journal of Transport Geography*. 2018. 68: 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>
15. Tesar M., Berthold K., Gruhler J-P., Gratzfeld P. Design Methodology for the Electrification of Urban Bus Lines with Battery Electric Buses // *Transportation Research Procedia*. 2020. 48: 2038-2055. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.264>
16. Hamurcu M., Eren T. Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation // *Sustainability*. 2020. 12(7). Article No.2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>
17. Krawiec K. Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport // *Transport Problems*. 2021. 16(1): 99-112. 10.21307/tp-2021-009
18. Topić J., Soldo J., Maletić F., Škugor B., Deur J. Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning // *Energies*.2020. 13(13). Article No. 3410. <https://doi.org/10.3390/en13133410>
19. Lin K.C., Lin C.N., Ying J.C. Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning // *Applied Sciences*. 2020. 10(17). Article No. 6088. <https://doi.org/10.3390/app10176088>
20. Косицын Б.Б. Экспериментальное исследование энергоэффективного закона управления движением электробуса на городском маршруте // *Журнал автомобильных инженеров*. 2017. №5 (106). С. 15–23.
21. Фролов Д.С. Электробус... Опыт эксплуатации в России. – М.: ГУП «Мосгортранс», 2017. URL: http://www.mueta-ufa.ru/files/Razvitiye_tramvaynoy_seti_.pdf

REFERENCES

1. Conti V., Orchi S., Valentini M., Nigro M., Calo R. Design and evaluation of electric solutions for public transport // *Transportation Research Procedia*. 2017. 27: 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.033>
2. Fusco G., Alessandrini A., Colombaroni Ch., Pia Valentini M. A model for transit design with choice of electric charging system // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. 8: 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.607>
3. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis M. Sustainable urban transit network design // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 7: 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
4. Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D. Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems //

International Journal of Sustainable Transportation. 2017. 10 (11): 707-720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>

5. De Filippo G., Marano V., Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University // *Applied Energy*. 2014. 11: 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.011>

6. Vepsäläinen J., Kivekäs K., Otto K., Lajunen A., Tammi K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. 63: 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>

7. Basma H., Mansour Ch., Haddad M., Nemer M., Stabat P. Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses // *Energy*. 2020. Vol. 207. Article No. 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>

8. Gallet M., Massier T., Hamacher T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks // *Applied Energy*. 2020. 230: 344-356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>

9. Gallet M., Massier T., Zehe D. Developing a Large-Scale Microscopic Model of Electric Public Bus Operation and Charging. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. January 2020. 10: 1-5. 10.1109/VPPC46532.2019.8952361

10. Gabsalikhova L., Sadygova G., Almetova Z. Activities to convert the public transport fleet to electric buses // *Transportation Research Procedia*. 2018. 36: 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>

11. Bezruchonak A. Geographic features of zero-emissions urban mobility: the case of electric buses in Europe and Belarus // *European spatial research and policy*. 2019. 26(1): 81-99. 10.18778/1231-1952.26.1.05

12. Deliali A., Chhan D., Oliver J., Sayess R., Godri Politt K.J., Chritofa E. Transitioning to zeroemission bus fleets: state of practice of implementations in the United States // *Transport Reviews*. 2021. 41(2): 164-191. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>

13. Pelletier S., Jabali O., Mendoza J.E., Laporte G. The electric bus fleet transition problem // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. 109: 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>

14. Wei R., Liu X., Ou Y., Kiavash Fayyaz S. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system // *Journal of Transport Geography*. 2018. 68: 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>

15. Tesar M., Berthold K., Gruhler J-P., Gratzfeld P. Design Methodology for the Electrification of Urban Bus Lines with Battery Electric Buses // *Transportation Research Procedia*. 2020. 48: 2038-2055. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.264>

16. Hamurcu M., Eren T. Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation // *Sustainability*. 2020. 12(7). Article No.2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>

17. Krawiec K. Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport // *Transport Problems*. 2021. 16(1): 99-112. 10.21307/tp-2021-009

18. Topić J., Soldo J., Maletić F., Škugor B., Deur J. Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning // *Energies*. 2020. 13(13). Article No. 3410. <https://doi.org/10.3390/en13133410>

19. Lin K.C., Lin C.N., Ying J.C. Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning // *Applied Sciences*. 2020. 10(17). Article No. 6088. <https://doi.org/10.3390/app10176088>

20. Koscyn B.B. Jeksperimental'noe issledovanie jenergojeffektivnogo zakona upravlenija dvizheniem jelektrobusa na gorodskom marshrute. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2017, 5 (106): 15-23. (In Russian)

21. Frolov D. S. Jelektrobus... Opyt jekspluatatsii v Rossii. – M.: GUP «Mosgortrans», 2017. URL: http://www.mueta-ufa.ru/files/Razvitiye_tramvaynoy_seti+.pdf (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Горбунова А. Д. Анализ ранее выполненных работ, разработка алгоритма и его верификация.

Смирнова О. Ю. Корректировка схемы взаимного влияния факторов при выборе маршрута, проверка алгоритма на наличие причинно-следственных связей.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anastasia D. Gorbunova – analysis of previous researches, development of an algorithm and its verification

Olga Yu. Smirnova – correction of the mutual relation scheme of factors for selecting a route, checking the algorithm for the presence of causal relationships.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбунова Анастасия Дмитриевна – аспирант кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Тюменского индустриального университета, ORCID: 0000-0002-5083-2601 (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: gorbunovaad94@gmail.com).

Смирнова Ольга Юрьевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта строительных и дорожных машин, ORCID: 0000-0001-8951-6449 (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: smirnovaaj@tyuiu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia D. Gorbunova – Postgraduate student of the Motor Transport Operation Department, Industrial University of Tyumen, ORCID: 0000-0002-5083-2601 (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38, e-mail: gorbunovaad94@gmail.com)

Olga Yu. Smirnova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobile Transport, Construction and Road Machine Department, ORCID: 0000-0001-8951-6449 (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38, e-mail: smirnovaaj@tyuiu.ru)

УДК 621.757

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405>

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВАННЫ ХРОМИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА

А.Н. Котомчин

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе хромирования деталей автомобилей происходит изменение состава ванны хромирования, что влияет на стабильность протекающих процессов – производительность и качество хромового покрытия. Поэтому требуется постоянный контроль ванны хромирования на наличие посторонних элементов, которые могут образоваться в процессе работы ванны при реакции раствора с анодом или катодом.

Материалы и методы. При проведении исследований применялось необходимое оборудование, позволявшее с достаточной точностью определять содержание трёхвалентного хрома и влияние его на процесс электролиза – производительность и качество хромовых покрытий. Для определения качества и производительности использовалась известная методика.

Результаты. При проведении исследований полученного холодного саморегулирующегося электролита хромирования было установлено, что существенное влияние на стабильность работы ванны хромирования оказывает трёхвалентный хром – содержание, которое при работе может меняться в пределах 2...25 г/л. В результате выяснили, что оптимальным количеством трёхвалентного хрома является содержание его в ванне хромирования от 2 до 15 г/л. При меньшем или большем содержании происходит снижение производительности электролиза и качества хромового покрытия. Также было установлено, что для поддержания оптимального количества трёхвалентного хрома и увеличения времени для стабильной работы хромовой ванны необходимо соблюдение отношения площади анода и катода (покрываемой поверхности детали), значение которого находится в пределах 3...4.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований даст возможность при выполнении определённых условий, проведения процесса осаждения хрома из холодного саморегулирующегося электролита позволит стабильно проводить осаждение хрома при высокой производительности и необходимым качеством получаемых покрытий. Главное условие сохранения долговечности и стабильности ванны хромирования – контроль и поддержание количества трёхвалентного хрома в электролите хромирования в ванне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хромирование, долговечность, стабильность, трёхвалентный хром, анод, катод, количество электричества, рассеивающая способность.

БЛАГОДАРНОСТИ. Благодарность рецензентам статьи.

Поступила 05.07.21, принята к публикации 31.08.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Котомчин, А.Н. Оптимизация работы ванны хромирования при восстановлении деталей автотранспорта / А.Н. Котомчин. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 390-405.

© Котомчин А.Н., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405>

OPTIMIZATION OF THE CHROME PLATING BATH OPERATION DURING THE RESTORATION OF VEHICLE PARTS

Aleksei N. Kotomchin

*Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia*

ABSTRACT

Introduction. In the process of chrome plating of car parts, there is a change in the composition of the chrome plating bath, which affects the stability of the ongoing processes – the performance and quality of the chrome coating. Therefore, it is necessary to constantly monitor the chrome plating bath for the presence of foreign elements that can be formed during the operation of the bath during the reaction of the solution with the anode or cathode.

Materials and methods. During the research, the necessary equipment was used, which made it possible to determine with sufficient accuracy the content of trivalent chromium and its effect on the electrolysis process – the performance and quality of chrome coatings. A well-known technique was used to determine the quality and performance.

Results. When conducting studies of the obtained cold self-regulating chromium plating electrolyte, it was found that trivalent chromium has a significant effect on the stability of the chromium plating bath. The content of which can vary within 2...25 g/l during operation. As a result, it was found that the optimal amount of trivalent chromium is its content in the chromium plating bath from 2 to 15 g/l. With a lower or higher content, the electrolysis performance and the quality of the chrome coating decrease. It was also found that in order to maintain the optimal amount of trivalent chromium and increase the time for stable operation of the chromium bath, it is necessary to observe the ratio of the area of the anode and cathode (the coated surface of the part), the value of which is within 3...4.

Discussion and conclusion. As a result of the conducted research, it will make it possible, under certain conditions, to carry out the process of chromium deposition from a cold self-regulating electrolyte, which will allow for stable chromium deposition at high productivity and the necessary quality of the coatings obtained. The main condition is to control and maintain the amount of trivalent chromium in the chromium plating electrolyte in the bath.

KEYWORDS: Chrome plating, durability, stability, trivalent chromium, anode, cathode, amount of electricity, scattering capacity.

GRATITUDES. Thanks to the reviewers of the article.

Submitted 05.07.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Kotomchin A.N. Optimization of the chrome plating bath operation during the restoration of vehicle parts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2021; 18 (4): 390-405. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405>.

© Kotomchin A.N., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Процесс электролитического хромирования имеет ряд особенностей, отличающих его от других гальванических процессов.

К числу этих особенностей относится применение нерастворимых анодов и высоких плотностей тока. Хромовые электролиты отличаются сравнительно более низким выходом по току и плохой рассеивающей способностью.

Наиболее распространенным электролитом хромирования является универсальный, который используют для получения износостойких блестящих покрытий толщиной до 0,25 мм.

С целью увеличения толщины покрытия с требуемым качеством покрытий учёными были проведены исследования для получения более производительных электролитов, которые бы позволили увеличить предельную толщину покрытий до 0,7...1 мм с наименьшими затратами времени и труда [1]. Было выявлено, что одним из перспективных электролитов хромирования является холодный, саморегулирующийся электролит хромирования, обладающий рядом преимуществ: это высокая производительность, рассеивающая способность при получении бестрециноватых осадков с высокой износостойкостью и твёрдостью. Однако в процессе работы возникала необходимость контроля и корректировки содержания в растворе различных элементов, которые влияют на стабильность проведения процесса хромирования.

Для правильной работы электролитов хромирования требуется его постоянный анализ и корректировка для получения необходимого качества покрытия с заявленной производительностью и рассеивающей способностью.

Плохая рассеивающая способность хромового электролита, наряду с низким выходом по току и небольшой величиной электрохимического эквивалента хрома, приводит к тому, что глубокие участки рельефных изделий часто вообще не покрываются хромом. Кроме того, в результате местной концентрации силовых линий на торцах изделия, подвергающегося хромированию, обычно образуются наросты хрома (диндриты). При хромировании внутренней поверхности цилиндров и наружной поверхности валов, при неправильном положении катодов относительно хромируемой поверхности может образоваться различной толщины покрытие с эллипсом или конусом, устранение которых может быть затруднительно [2, 3].

Известно, что при использовании универсального электролита хромирования для нормальной работы хромового электролита, кроме содержания в нем хромового ангидрида – шестивалентного хрома (CrO_3) и серной кислоты (H_2SO_4), необходимо также содержание небольшого количества трехвалентного хрома (Cr^{3+}). Последний при составлении электролита не вводится, учитывая, что он быстро накапливается в процессе работы ванны в результате восстановления шестивалентного хрома на катоде. Поэтому хромовый электролит после приготовления требует проработки током для накопления ионов трехвалентного хрома. Для проработки электролит нагревается до $t=45-50^\circ$, на катодную штангу завешивается максимальное количество плоских свинцовых анодов, а на анодную штангу в 3–4 раза меньше (по площади). После этого включают ток при напряжении $U=6-8$ вольт. При этом катодная плотность тока в несколько раз меньше анодной (из-за отношения анодной и катодной поверхности). Процесс восстановления на катоде идет интенсивнее процесса окисления на аноде, так как при повышенной плотности тока на аноде имеет место газообразное выделение кислорода и только в незначительной степени идет процесс обратного окисления образовавшегося на катоде трехвалентного хрома [4].

Процесс проработки нормально продолжают 5–6 ч, после чего аналитически проверяют содержание в электролите трехвалентного хрома (Cr_2O_3), которое должно быть в пределах 1–2% от хромового ангидрида. При получении удовлетворительных результатов анализа производят пробное хромирование. Переходить к рабочему хромированию можно только после того, как будут получены светлые блестящие осадки. Внешне конец проработки ванны током определяется по интенсивному и равномерному выделению пузырьков газа на аноде.

Однако неравномерное выделение газа, толчками, сопровождаемое колебаниями стрелки амперметра и уменьшением силы тока, при одновременном увеличении напряжения по вольтметру свидетельствует об избытке в электролите Cr^{3+} , поэтому для поддержания долговечности и стабильности работы ванны хромирования возникает необходимость определения закономерности накопления Cr^{3+} и влияние его на процесс электролиза в целом.

ТЕОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований было установлено, что при повышенном содержании трехвалентного хрома увеличивается сопро-

тивление электролита и падает плотность тока. В результате суживается интервал плотностей тока, при котором получают блестящие осадки, а также иногда образуются темные осадки, подобные получаемым при недостатке SO_4 в электролите [5].

Контроль содержания трехвалентного хрома лучше производить два раза в месяц и, кроме того, систематическим наблюдением за характером выделения газов на катоде, которое должно быть интенсивным и равномерным. Характерным признаком избытка трехвалентного хрома является выделение газа на катоде толчками.

Уменьшение содержания трехвалентного хрома в электролите производилось аналогичной проработкой с той разницей, что площадь анодов берется максимальной, а площадь катодов минимальной. В этом случае анодная плотность тока будет в несколько раз меньше катодной и процесс окисления трехвалентного хрома в шестивалентный на аноде пойдет интенсивнее катодного восстановления шестивалентного хрома в трехвалентный. Так, на катоде при повышенной плотности тока будет иметь место газообразное выделение водорода и только в незначительной степени образование трехвалентного хрома. В процессе работы хромовой ванны она периодически подвергается проработке для установления нормального содержания в электролите хромирования трехвалентного хрома в пределах 2...10 г/л.

В связи с применением нерастворимых анодов, а также вследствие уноса электролита изделиями и выделяющимися газами хромовый электролит быстро обедняется содержанием хромового ангидрида.

При использовании холодного саморегулирующегося электролита хромирования возникает одна из проблем, которая значительно влияет на рассеивающую способность электролита и тем самым на производительность и качество покрытий. Необходимо рассмотреть, какое влияние оказывает Cr^{3+} при различных его концентрациях (г/л) на рассеивающую способность исследуемого электролита.

Согласно данным многих учёных (Н.И. Корнейчук, Ю.Н. Петров, М.А. Шлугер) был выделен холодный саморегулирующийся электролит, который обладает рядом преимуществ – высокая производительность и получение хромовых осадков с хорошими физико-механическими свойствами. Для сохранения хороших качеств данного электролита были проведены исследования и разработан новый состав холодного саморегулирующегося электролита, позволив-

шего увеличить диапазон рабочих температур в диапазоне 18...35°С при плотности тока 75...200 А/дм². Это обеспечивает повышение производительности процесса и качества осадков хрома, при котором выход металла по току составляет 47,5...50%, микротвердость покрытий во всём интервале плотностей тока достигает 8500...11500 Мпа с одновременным повышением их износостойкости [6].

Таким образом, по сравнению со стандартным электролитом хромирования (выход металла по току – 15...17%, плотность тока 40...70 А/дм²) при сопоставимых энергозатратах на нагрев горячего электролита и охлаждение холодного саморегулирующегося электролита и сопоставимых физико-механических свойств покрытий предложенный способ хромирования обеспечивает снижение энергозатрат на единицу толщины покрытия не менее чем в 2 раза. А если учесть возможность получения качественных покрытий хрома в холодном саморегулирующемся электролите толщиной до 0,5...0,7 мм, за 2 часа работы электролитической ванны по сравнению с ваннами горячего типа, где максимальная толщина хрома составляет 0,3 мм и достигается за 8...10 ч работы, то преимущества холодного электролита хромирования становятся ещё весомее [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Поэтому одновременно возникла необходимость сравнительной оценки рассеивающей способности холодного саморегулирующегося электролита хромирования, описанного ранее, а также влияния плотности тока и времени хромирования на эту способность электролита.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения исследования стабильности высокопроизводительного электролита в качестве объекта исследований был взят холодный саморегулирующийся электролит хромирования (ХСЭХ), использование которого требует поддержание рабочей температуры электролита в пределах 18...35°С.

Площадь покрываемой детали (катода) равна $S_k=0,1\text{дм}^2$ – образцы диаметром 12 мм, длиной 26,5 мм.

Состав исследуемого электролита следующий: хромовый ангидрид (CrO_3) 420...450 г/л, сульфат кобальта ($\text{CoSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 10 г/л, сульфат никеля ($\text{NiSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 10 г/л, плавиковая кислота (HF) 0...1г/л. Плотность тока 75–200А/дм². Выход по току до 50%, микротвёрдость до 11500 МПа. Объём приготавливаемого электролита – 8 л.

При приготовлении электролита соблюдалась определённая последовательность и требования. Очищенную и высушенную ванну с известным объемом заполнили на 2/3 объема дистиллированной водой. Затем небольшими порциями засыпалась навеска расчётного количества хромового ангидрида, необходимого для получения заданной концентрации хромовой кислоты. После растворения хромового ангидрида осторожно, мелкими порциями, в ванну присыпался углекислый кальций, чтобы температура раствора в ванне не превышала 40° С. Для добавления сульфата никеля и кобальта их предварительно растворяли в отдельном сосуде с дистиллированной водой в необходимом количестве, заливая в ванну, тщательно перемешивая с содержимым. Затем измерялась с помощью ареометра плотность раствора, при температуре 20° С, и прибавлением в ванну дистиллированной воды доводили её до оптимального значения.

Используемое необходимое оборудование: ванна хромирования ОГ-1349А; источник эл. тока ВАКГ-1600, ванна для промывки 70-7888-1100 ГОСНИТИ.

Аноды изготавливались из сплава свинца, сурьмы и олова при следующем соотношении: 92–95% свинца, 0,5% сурьмы и 5–8% олова. Этот состав анода необходим для исключения образования на поверхности анодов трудно растворимых оксидов свинца и фторида кальция, которые могут увеличить электрическое сопротивление и тем самым расход электроэнергии.

Для дальнейшего использования электролита нужно, чтобы он стабилизировался до 8 ч для нормализации его температуры и выпадения в осадок сульфата кальция (образование донной фазы). Затем в течение 6–10 ч была необходимость проработки электролита с целью образования необходимого количества трёхвалентного хрома в количестве не менее 2...15 г/л для обеспечения устойчивой работы электролита.

Для достоверности исследований и исключения влияния температуры использовалась установка для поддержания рабочей температуры в интервале температур от 18...35° С [15].

Качество покрытий оценивали по состоянию морфологии и величине микротвёрдости покрытия с помощью микроскопа МИМ-8М с цифровой приставкой и микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 1Н.

Образцы, просушенные в сушильном шкафу, подготовленные для исследований опре-

деления выхода хрома по току, взвешивались на весах 1-го класса точности АДВ-200.

Толщина покрытия измерялась микрометром МК 0-25 по ГОСТ 6507–90.

Содержание Cr (III) определяли по разности между количеством общего хрома и шестивалентного:

$$C_{Cr(III)} = C_{Cr(общ)} - C_{Cr(VI)}, \text{ г/л}, \quad (1)$$

где $C_{Cr(общ)}$ – общее количество хрома, г/л;
 $C_{Cr(VI)}$ – количество шестивалентного хрома, г/л.

Наклон общей прямой отражает интенсивность накопления Cr^{3+} (J), которую можно выразить отношением

$$J = \frac{C}{Q}, \quad (2)$$

где C – концентрация Cr^{3+} в электролите, г/л;
 Q – количество электричества, прошедшего через раствор, А·ч.

$$Q = I \cdot t, \quad (3)$$

где I – сила тока, А;
 t – время электролиза, ч;

Применительно к гальваническим процессам:

$$I = D_k \sum_{i=1}^n S_k, \quad (4)$$

где D_k – катодная плотность тока А/дм²;

$\sum_{i=1}^n S_k$ – суммарная площадь катода, дм².

Подставляя значения (4) в выражение (3), получаем

$$Q = D_k \sum_{i=1}^n S_k \cdot t. \quad (5)$$

Окончательное выражение интенсивности накопления трехвалентного хрома в электролите при исследуемом отношении его объема (л) к площади катода (дм²):

$$\frac{V_s}{S_k} = \frac{8}{0.1} = 80.$$

Формулу для расчета рабочего времени исследуемой ванны до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в электролите C_{max} можно представить из выражения (2):

$$t_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{max}}}{D_k \cdot S_k \cdot J_n}, \quad (6)$$

где C_{max} – максимально возможная концентрация трёхвалентного хрома для проведения стабильного электролиза, г/л;

S_k – площадь катода (покрываемой поверхности детали), дм^2 .

Для расчета рабочего времени производственной ванны с известным отношением n необходимо учитывать кратность (K) единичного объема раствора в общем (V) всей ванны:

$$K = \frac{V}{V_e}. \quad (7)$$

Общая формула для определения времени работы ванны хромирования в холодном саморегулирующемся электролите до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в растворе имеет вид:

$$T = \frac{C_{\text{max}} \cdot V}{D_k \cdot \sum_{i=1}^n S_k \cdot J_n \cdot V_e} \cdot \text{ч}. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установлено, что для исследуемого электролита при $D_k = 75 \div 200 \text{ Адм}^2$ выход металлического хрома по току почти постоянный ($47,5 \pm 2,5\%$).

Для оценки рассеивающей способности электролита в качестве критерия взяли отношение минимального веса хрома, осажденного на части катода, к среднему весу, приходящемуся на одну часть

$$K_p = M_{\text{мин}} / M_{\text{ср}}. \quad (9)$$

На рисунке 1 показано изменение K_p в зависимости от средней плотности тока ($D_{\text{ксп}}$) и времени хромирования.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Рассеивающая способность холодного электролита хромирования лучше, чем универсального.

2. С увеличением средней плотности тока рассеивающая способность холодного электролита улучшается.

В начальный период хромирования рассеивающая способность холодного электролита изменяется в зависимости от времени хромирования.

Рассеивающая способность системы электрод–электролит определяется многими факторами, такими как концентрация компонентов электролита, продуктов промежуточных электрохимических реакций, природой различных добавок к электролиту и некоторыми другими факторами, сущность которых будет изложена ниже [16, 17, 18, 19].

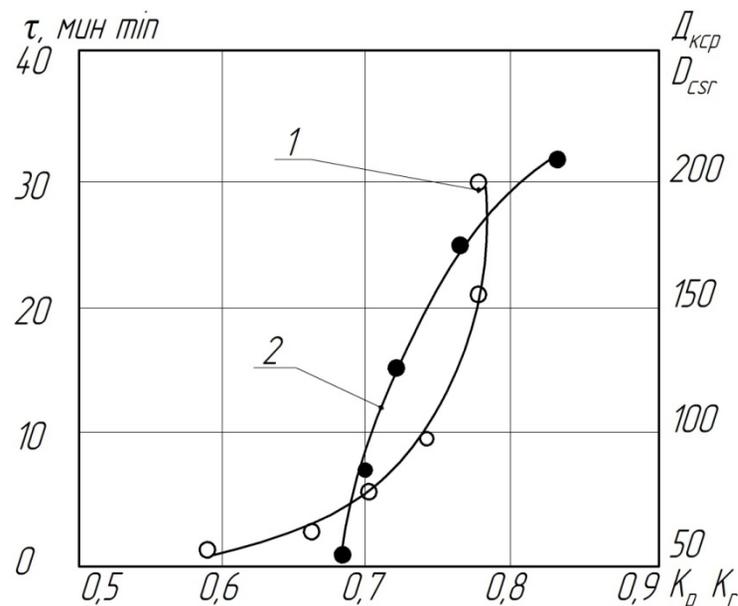


Рисунок 1 – Изменение рассеивающей способности (K_p) электролита в зависимости от времени хромирования (t) и средней плотности тока ($D_{\text{ксп}}$); 1 – время хромирования; 2 – $D_{\text{ксп}}$

Figure 1 – Change in the scattering capacity (K_r) of the electrolyte depending on the chrome plating time (t) and the average current density (D_{csr}); 1 – the chrome plating time; 2 – D_{csr}

Опытным путём установлено, что в процессе электроосаждения хрома количественный состав компонентов электролита постепенно меняется. Наиболее быстро происходит изменение концентрации трехвалентного хрома – продукта неполного восстановления хромовой кислоты.

Известно, что повышенная концентрация трехвалентного хрома способствует снижению электропроводности и рассеивающей способности раствора, ухудшению физико-механических свойств осадков. В зависимости от ионного состава электролита оптимальная концентрация в нем Cr^{3+} может колебаться в широком интервале: от нескольких единиц до 20 г/л и выше [20]. В практике хромирования стабильность концентрации Cr^{3+} в растворе поддерживается выбором соответствующего отношения площадей катода и анода¹. На последнем происходит окислительная реакция $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{6+}$.

Результаты лабораторных исследований и опыт промышленного применения высокопроизводительного способа хромирования в холодном саморегулирующемся электролите показали, что рекомендуемое большинством авторов оптимальное отношение площадей

анода (S_a) к катоду (S_k) $S_a/S_k=1,5...2$ не обеспечивает стабильности концентрации Cr^{3+} в электролите. В связи с этим возникла необходимость дополнительных исследований.

В исследовательской работе изучались интенсивность накопления трехвалентного хрома в процессе электролиза холодного саморегулирующегося электролита, а также изменение выхода хрома по току и микротвердости осадков.

На основании полученных данных можно произвести расчет рабочего времени ванны хромирования до накопления предельной концентрации трехвалентного хрома в электролите.

Исследованиями также установлено (рисунок 2), что с увеличением (D_k) концентрация Cr^{3+} прямо пропорциональна плотности тока и закономерность носит линейный характер.

Рисунок 2 показывает, что рост концентрации Cr^{3+} в растворе происходит по прямолинейному закону. Наклон прямой отражает интенсивность накопления Cr^{3+} [20].

Данные разработки показали, что при всех исследуемых отношениях $m=S_a/S_k$ как $m<1$, так и $m>1$ в процессе электролиза происходит увеличение концентрации трехвалентного хрома в растворе (рисунок 3).

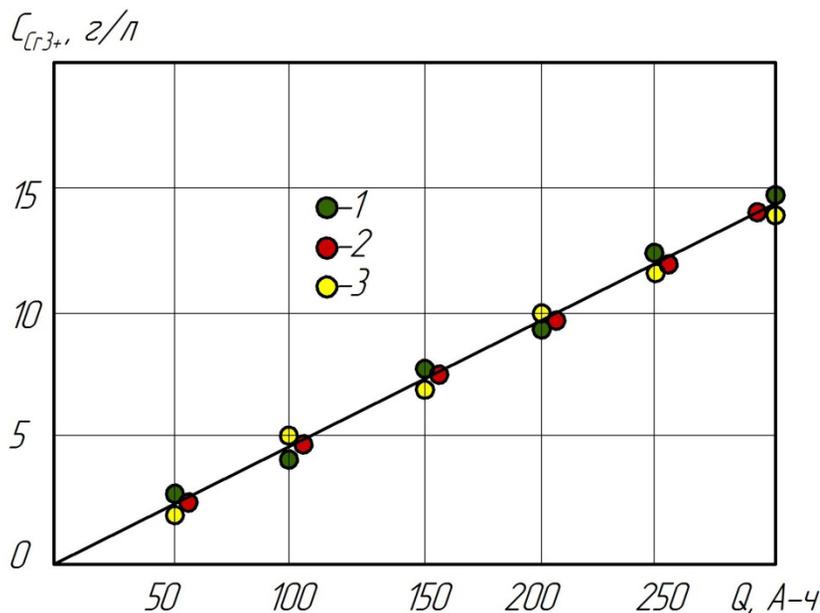


Рисунок 2 – Изменение концентрации трехвалентного хрома ($C_{Cr^{3+}}$, г/л) в зависимости от количества прошедшего через раствор электричества (Q , А-ч) при отношениях площади анода к площади катода (S_a/S_k): 1–2/1; 2–4/1; 3–8/1

Figure 2 – Change in the concentration of trivalent chromium ($C_{Cr^{3+}}$, g/l) depending on the amount of electricity (Q , A-h) passed through the solution at the ratio of the area of the anode and cathode (S_a/S_k): 1-2/1; 2-4/1; 3-8/1

¹ Петров Ю.Н. Аномалии процесса хромирования в холодных электролитах/ Ю.Н. Петров, М.П. Стратулат, А.И. Ковбасюк // Труды Кишиневского СХИ. Т. 75 – Кишинев: – 1970. – С. 142–146.

При отношении $m < 1$ ($1/2$) высокая анодная плотность тока (200 A/дм^2) обуславливает образование на анодной поверхности плотного слоя перекиси свинца, следствием чего является резкое увеличение напряжения в электрической цепи и снижение катодной плотности тока. При отношении $m > 1$ катодный процесс протекает более устойчиво, с равномерной интенсивностью накопления трехвалентного хрома (рисунок 3, кривая 1). В пределах концентраций ($C = 0 \dots 15 \text{ г/л}$) выход хрома по току и качество покрытий практически одинаковы. При концентрации Cr^{3+} от 9 до 15 г/л наблюдается постепенное снижение выхода хрома по току и увеличение микротвердости осадков (рисунок 3, кривая 2). При увеличении концентрации более 15 г/л покрытия темнеют, снижается их микротвердость, по краям образцов появляется порошкообразный рыхлый осадок [21, 22, 23].

Можно заключить, что концентрация Cr^{3+} в растворе около 15 г/л является предельной. Дальнейшая эксплуатация ванны становится нецелесообразной вследствие нарушения нормальных условий электрокристаллизации осадка.

На основании полученных данных нами произведен расчет рабочего времени ванны хромирования до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в разработанном электролите.

При катодной плотности тока 150 A/дм^2 и объема используемого электролита 2 л интенсивность накопления составит $J_{20} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ г/л А-ч}^2$.

При изменении отношения объема электролита к площади катода интенсивность накопления Cr^{3+} будет увеличиваться или уменьшаться по обратной зависимости. Если площадь катода постоянная $S_k = 0,1 \text{ дм}^2$, то

отношение $\frac{V}{S_k}$ можно изменять только за счет объема раствора, который в каждом случае будет единичным (V_e). Обозначив $\frac{V}{S_k}$ через n , интенсивность J_n можно вычислить из пропорции

$$\frac{J_{20}}{J_n} = \frac{n}{20}, \text{ откуда } J_n = \frac{J_{20} \cdot 20}{n}.$$

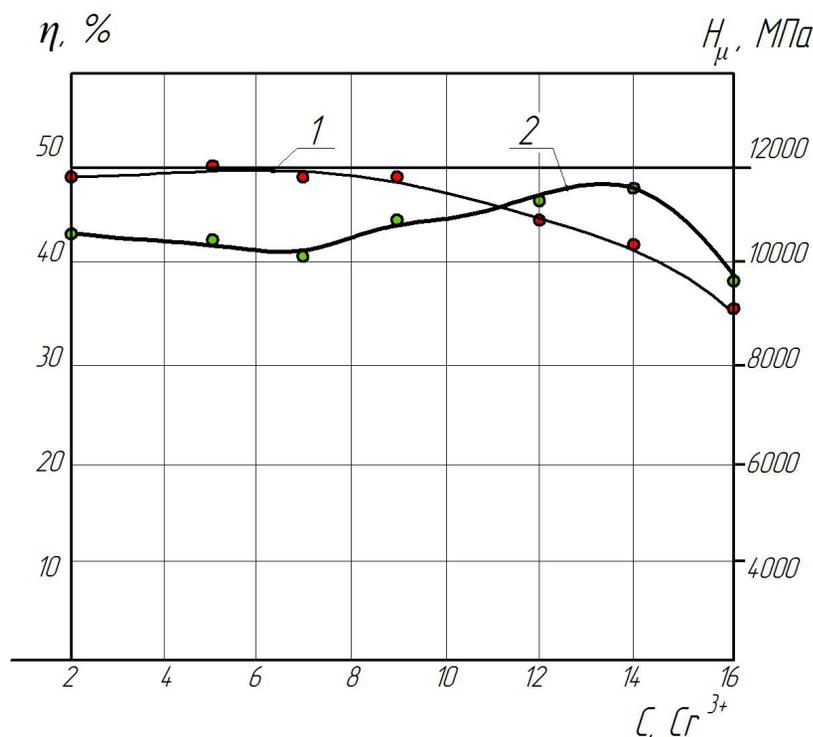


Рисунок 3 – Влияние концентрации трехвалентного хрома ($C_{\text{Cr}^{3+}}$, г/л) в электролите хромирования: 1 – выход металлического хрома по току ($\eta, \%$), 2 – микротвердость покрытий ($H_\mu, \text{МПа}$)

Figure 3 – Effect of the concentration of trivalent chromium ($C_{\text{Cr}^{3+}}$, g / l) in the chromium plating electrolyte: 1 – the current output of metallic chromium ($\eta, \%$), 2 – the microhardness of coatings (H_μ, MPa)

² Корнейчук Н.И. Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования / Н.И. Корнейчук, А.И. Ковбасюк, А.В. Лисник // Труды Кишиневского СХИ, т. 144. – Кишинев: 1975. – С. 17–23.

Для стабильного поддержания рабочей температуры электролита хромирования (с целью улучшения теплообмена раствора ванны) использовали соотношение объема ванны хромирования (V_B) к покрываемой площади (S_K) $n=V_B/S_K=80\dots 100$ л/дм².

Тогда для единичного объема электролита $V_e = 8$ л.

$$J_{80} = \frac{20 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{80} = 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ г/л А-ч.}$$

Расчет рабочего времени исследуемой ванны до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в электролите C_{max} при $\frac{V_e}{S_K} = 80$, $D_K = 150$ А/дм², $J_{80} = 0,0075$ г/л А-ч и $C_{max} = 15$ г/л можно рассчитать из выражения (6):

$$t_{80} = \frac{15}{150 \cdot 0,1 \cdot 0,0075} = 133,3 \text{ ч.}$$

Из рисунка 4 видно, что кривая 1 при отношении объема электролита к площади покрываемой детали 80 увеличивает работоспособность ванны хромирования, при этом снижение данного значения до 50 ограничивает область продолжительности работы ванны хромирования с нормальными условиями электрокристаллизации осадков при значениях $D_K = 75\dots 200$ А/дм².

В результате исследований было установлено, что при повышенном содержании трехвалентного хрома увеличивается сопротивление электролита и падает плотность тока. В результате суживается интервал плотностей тока, при котором получают осадки с необходимой толщиной, качеством и производительностью.

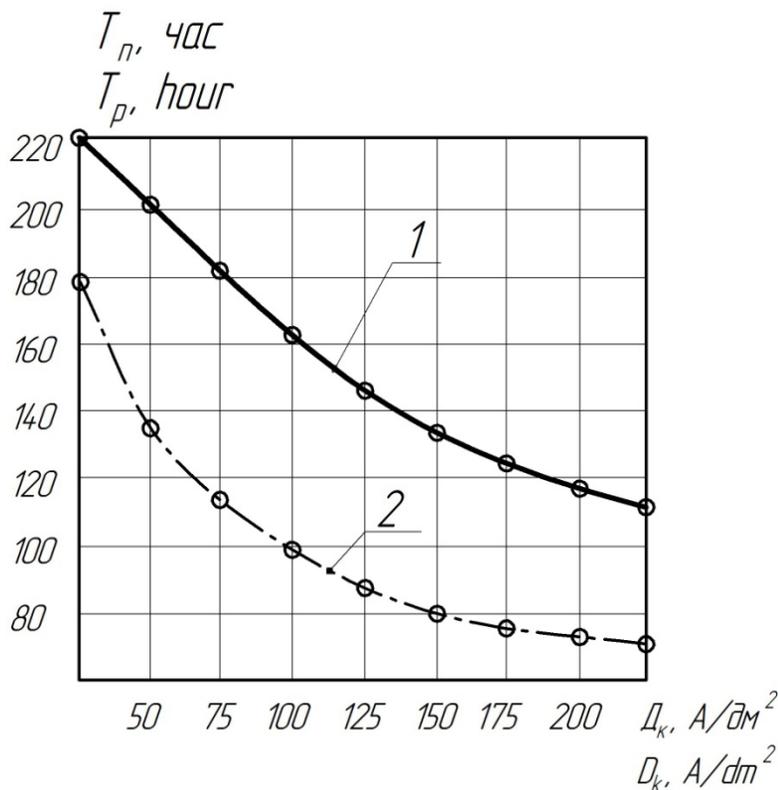


Рисунок 4 – Влияние катодной плотности тока (D_K , А/дм²) на время накопления предельной концентрации трехвалентного хрома (T_p , ч) в зависимости от покрываемой площади детали при значениях отношения объема ванны хромирования к площади катода ($\frac{V_e}{S_K}$, л/дм²): 1 – 80, 2 – 50

Figure 4 – Influence of the cathode current density (D_c , A/dm²) on the accumulation time of the maximum concentration of trivalent chromium (T_p , hour) depending on the covered area of the part at the ratio of the volume of the chromium plating bath to the cathode area ($\frac{V_e}{S_K}$, l/dm²): 1 – 80, 2 – 50

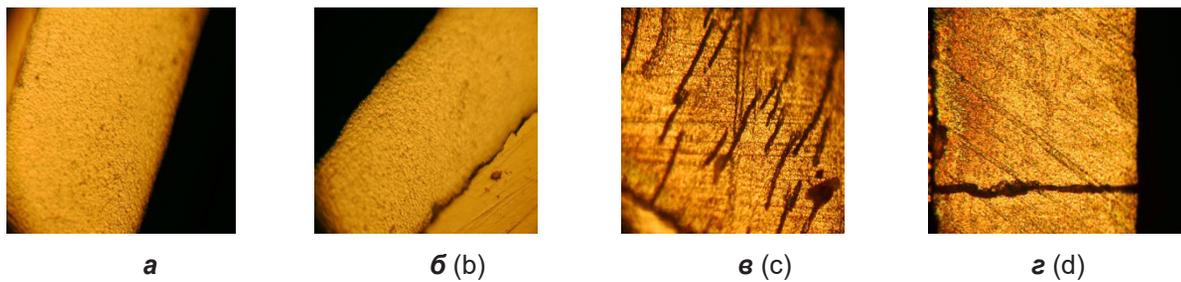


Рисунок 5 – Микрошлифы хромовых покрытий, полученных при количестве трёхвалентного хрома $C_{Cr^{3+}}$, г/л: а – 2–9, б – 9–15, в – 15–20, г – более 20 г/л

Figure 5 – Microslips of chrome coatings obtained: with the amount of trivalent chromium CCr^{3+} , g/l: a-2-9, b-9-15, c-15-20, d-more than 20 g/l

Таблица 1
Уровни варьирования факторов

Table 1
Levels of factors variation

Независимые факторы нижний уровень		Натуральное значение/кодированное		
		средний уровень	верхний уровень	
V_a/S_k , л/дм ²	X_1	20 (-1)	60 (0)	100 (1)
Q, А-ч	X_2	20 (-1)	160 (0)	300 (1)
S_a/S_k	X_3	1 (-1)	3 (0)	5 (1)

После накопления предельной концентрации трехвалентного хрома электролит подвергается специальной проработке на снижение в нем концентрации Cr^{3+} – прорабатывают током при большой поверхности анода и минимальной поверхности катода.

Для оценки качества покрытий были проведены исследования микрошлифов, получаемых хромовых покрытий при различном содержании Cr^{3+} , которые показаны на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно влияние концентрации $C_{Cr^{3+}}$ на качество покрытий, при котором при увеличении концентрации более 15 г/л качество покрытий падает. Так, при увеличении концентрации Cr^{3+} более 15 г/л появляются микротрещины на поверхности, снижается выход по току, а при концентрации более 20 г/л появляются сквозные трещины, которые снижают коррозионную стойкость и контактную прочность, делая нецелесообразным использование данных покрытий при восстановлении деталей автотранспорта.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью анализа полученных результатов и получения математической модели влияния различных независимых факторов, влияющих на накопление Cr^{3+} , была проведена математическая статистическая обработка данных.

С целью обработки данных выбраны наиболее значимые факторы, влияющие на процесс накопления Cr^{3+} – отношение объема ванны и площади катода (V_a/S_k , л/дм²), количество электричества, прошедшего через раствор (Q, А-ч) и отношение площади анода к катоду (S_a/S_k).

Для дальнейшей обработки данных выбраны уровни варьирования факторов, которые показаны в таблице 1, наименьшее значение фактора обозначено «-1», среднее значение «0» и максимальное значение «1» [24].

С целью более достоверной и точной обработки данных был выбран следующий план: 3–1–27, где 3 – количество независимых факторов, 1 – количество зависимых факторов, 27 – количество проведенных опытов. В качестве зависимого фактора взято накопление Cr^{3+} . Получаемые значения по накоплению Cr^{3+} взяты исходя из среднего значения трёх повторяющихся опытов.

Обработку данных и получение математической модели проводили с помощью программы Statistika, в которую включены необходимые формулы и расчёты. В результате обработки данных полученная математическая модель оказалась адекватной и предсказуемой. Полученные данные были с минимальными отклонениями от табличных значений Стьюдента и Фишера [24].

Таблица 2
Матрица трехфакторного плана типа 3–1–27

Table 2
Matrix of a 3-factor plan of type 3-1-27

N опыта	V/S_k , л/дм ²	Q, А-ч	S_p/S_k	Количество Cr ³⁺ , г/л
1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	6
2	-1,00000	-1,00000	0,00000	3
3	-1,00000	-1,00000	1,00000	1
4	-1,00000	0,00000	-1,00000	18
5	-1,00000	0,00000	0,00000	15
6	-1,00000	0,00000	1,00000	12
7	-1,00000	1,00000	-1,00000	26
8	-1,00000	1,00000	0,00000	22
9	-1,00000	1,00000	1,00000	18
10	0,00000	-1,00000	-1,00000	4
11	0,00000	-1,00000	0,00000	2
12	0,00000	-1,00000	1,00000	1
13	0,00000	0,00000	-1,00000	16
14	0,00000	0,00000	0,00000	14
15	0,00000	0,00000	1,00000	11
16	0,00000	1,00000	-1,00000	20
17	0,00000	1,00000	0,00000	18
18	0,00000	1,00000	1,00000	16
19	1,00000	-1,00000	-1,00000	2
20	1,00000	-1,00000	0,00000	1
21	1,00000	-1,00000	1,00000	0,5
22	1,00000	0,00000	-1,00000	14
23	1,00000	0,00000	0,00000	12
24	1,00000	0,00000	1,00000	10
25	1,00000	1,00000	-1,00000	17
26	1,00000	1,00000	0,00000	14
27	1,00000	1,00000	1,00000	11

Наблюдаемые и предсказанные значения 3-х уровневых факторов,
1 блок, остаточные SS=0,4963235, зависимая переменная Cr³⁺, г/л

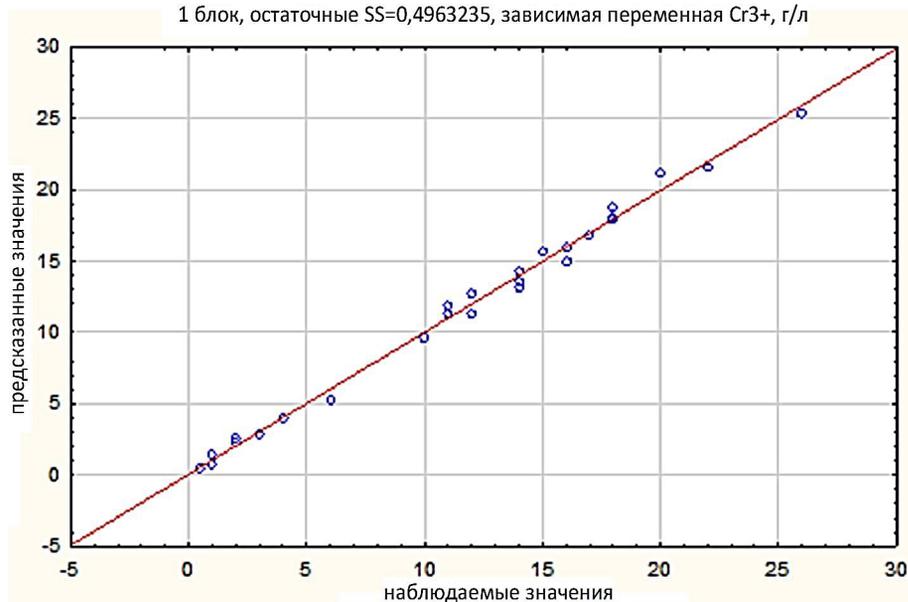


Рисунок 6 – График рассеивания наблюдаемых и предсказанных значений Cr³⁺, г/л

Figure 6 – Scatter plot of the observed and predicted values of Cr³⁺, g/l

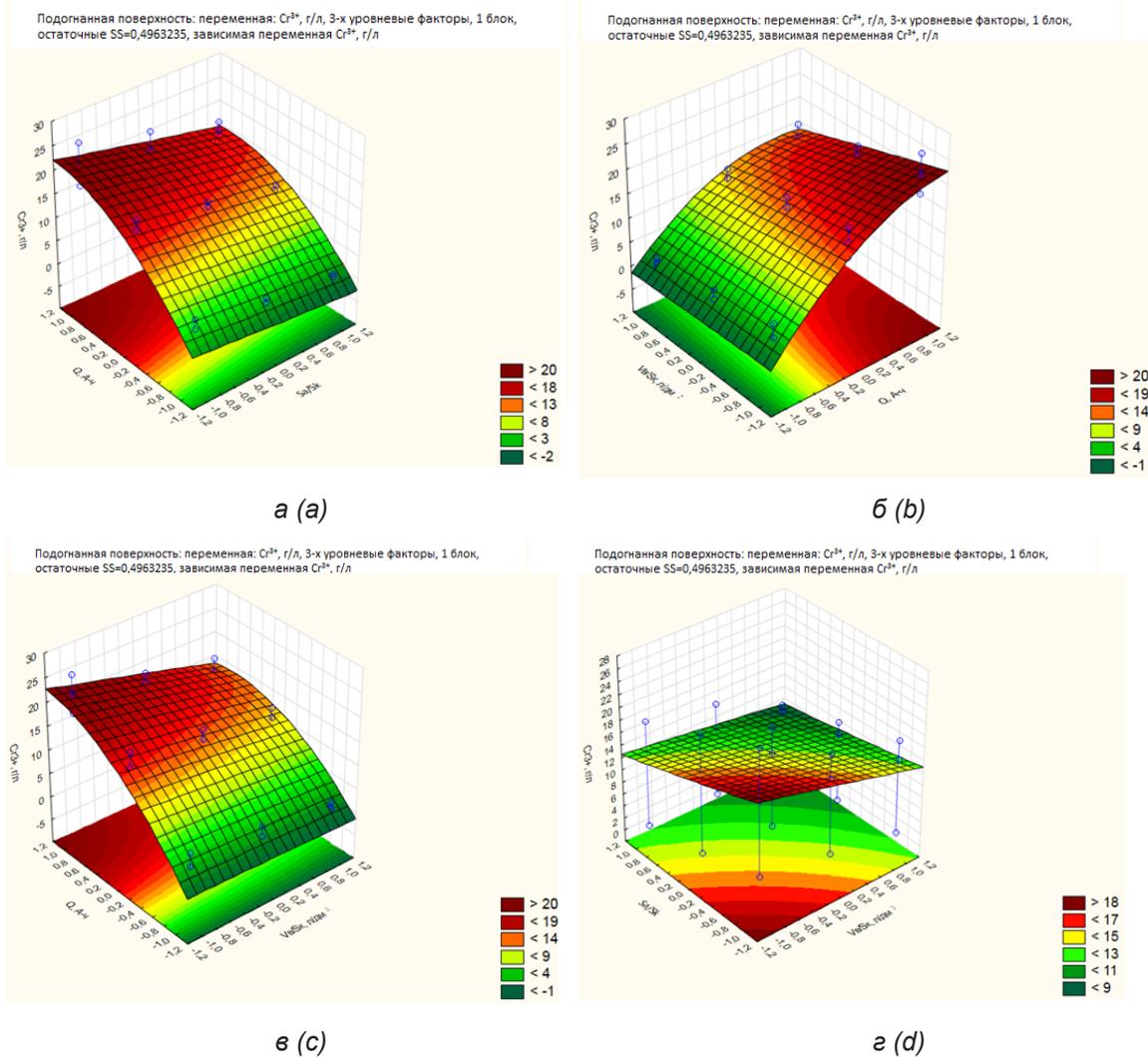


Рисунок 7 – Полученные поверхности зависимого фактора (Cr^{3+}) линейной модели при различных сочетаниях независимых факторов: а – влияние полученных значений Q , $A-h$ и S_a/S_k при среднем значении V_b/S_k , л/дм²; б – влияние полученных значений V_b/S_k , л/дм² и Q , $A-h$ при среднем значении S_a/S_k ; в – влияние полученных Q , $A-h$ и V_b/S_k , л/дм² при среднем значении S_a/S_k ; г – влияние S_a/S_k и V_b/S_k , л/дм² при среднем значении Q , $A-h$

Figure 7 – The obtained surfaces of the dependent factor (Cr^{3+}) of the linear model with various combinations of independent factors: a – the influence of the obtained values of Q , $A-h$ and S_a/S_k at an average value of V_b/S_k , l/dm²; b – the influence of the obtained values of V_b/S_k , l/dm² and Q , $A-h$ at an average value of S_a/S_k ; c – the influence of the obtained Q , $A-h$ and V_b/S_k , l/dm² at an average value of S_a/S_k ; d – the influence of S_a/S_k and V_b/S_k , l/dm² at an average value of Q , $A-h$

При обработке полученных результатов было получено, что все 27 точек располагаются в необходимой области факторного пространства, также они расположены симметрично относительно нуля, в результате которого закон их распределения близок к нормальному [25, 26, 27]. В результате этого влияние случайных и неслучайных факторов сведены к миниму-

му, при котором не требуется дополнительное проведение экспериментов (рисунок 6).

Для наглядности обработки данных и полученных результатов был проведен анализ факторов в зависимости от различных значений и влияния их на выходные данные Cr^{3+} (рисунок 7).

Оценки эффектов: R-кв.=,99403;Скор.,99087 (Таблица исходные 3-27-1) 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=,4963235 ЗП Cr ³⁺ , г/л										
Фактор	Эффект	Ст.Ош.	t(17)	p	-95, %		Коэф.	Ст.Ош.	+95, %	
					Дов.Пред	Дов.Пред			Дов.Пред	Дов.Пред
Сред/Св.член	11,27778	0,135582	83,1808	0,000000	10,99173	11,56383	11,27778	0,135582	10,99173	11,56383
(1)Vв/Sк, л/дм ² (L)	-4,38889	0,332106	-13,2153	0,000000	-5,08957	-3,68821	-2,19444	0,166053	-2,54479	-1,84410
Vв/Sк, л/дм ² (K)	0,08333	0,287612	0,2897	0,775518	-0,52347	0,69014	0,04167	0,143806	-0,26174	0,34507
(2)Q, А-ч(L)	15,72222	0,332106	47,3410	0,000000	15,02154	16,42290	7,86111	0,166053	7,51077	8,21145
Q, А-ч(K)	3,41667	0,287612	11,8794	0,000000	2,80986	4,02347	1,70833	0,143806	1,40493	2,01174
(3)Sa/Sk(L)	-4,72222	0,332106	-14,2190	0,000000	-5,42290	-4,02154	-2,36111	0,166053	-2,71145	-2,01077
Sa/Sk(K)	-0,08333	0,287612	-0,2897	0,775518	-0,69014	0,52347	-0,04167	0,143806	-0,34507	0,26174
1L на 2L	-2,91667	0,406745	-7,1708	0,000002	-3,77482	-2,05851	-1,45833	0,203372	-1,88741	-1,02926
1L на 3L	1,25000	0,406745	3,0732	0,006889	0,39184	2,10816	0,62500	0,203372	0,19592	1,05408
2L на 3L	-1,41667	0,406745	-3,4829	0,002847	-2,27482	-0,55851	-0,70833	0,203372	-1,13741	-0,27926

Рисунок 8 – Анализ дисперсии при получении математической линейной модели

Figure 8 – Analysis of the evaluation of effects when obtaining a mathematical linear model

В результате математической обработки данных, полученных в виде графических изображений независимых факторов, влияющих на накопление Cr³⁺, было установлено, что наиболее оптимальными значениями являются: V_в/S_к=80...100 л/дм², Q=120...200А-ч, S_а/S_к=3...4.

С целью получения уравнения регрессии с помощью программы Statistika были получены необходимые значимые коэффициенты, которые влияют на полученные значения по накоплению Cr³⁺ (рисунок 8).

При проведении дисперсионного анализа (см. рисунок 8) полученные данные в последних четырёх столбцах, взятых из полученных результатов расчёта программы Statistika, были включены как коэффициенты линейного уравнения регрессии при варьировании уровней значений зависимых факторов. Значения коэффициентов, выделенные красным, будут учитываться как значимые. В результате использования этих данных стало возможным вывести искомое уравнение регрессии получаемых значений накопления Cr³⁺, при котором оно примет вид

$$Y = 11,278 - 2,19X_1 + 7,86X_2 - 2,36X_3 - 1,45X_1X_2 + 0,625X_1X_3 - 0,708X_2X_3 + 1,708X_2^2, \quad (10)$$

где Y – предсказываемое значение накопления Cr³⁺, г/л;

X₁, X₂, X₃ – перекодированные независимые факторы (-1, 0, +1).

В результате полученное уравнение регрессии даст возможность предсказать возможные значения накопления трёхвалентного хрома

и тем самым предотвратить снижение производительности и качества получаемых хромовых покрытий, а также сэкономить время на химический анализ во время использования ванны хромирования при восстановлении или упрочнений деталей автотранспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при анализе полученных результатов и математической обработке данных было установлено, что для обеспечения нормальной работы ванны хромирования и использования всех преимуществ разработанного холодного саморегулирующегося электролита хромирования – выход металла по току 48...50%, микротвердость покрытий до 11500 Мпа и получение бестрещиноватых осадков, возникает необходимость соблюдения следующих условий:

1. Отношение площади анода к площади катода (восстанавливаемой поверхности детали) должно быть в пределах 3...4.

2. Концентрация Cr³⁺ в электролите должна поддерживаться в пределах 2...15 г/л.

3. Отношение объёма электролита ванны хромирования к площади катода должно быть в пределах 80...100 л/дм².

Кроме того, было установлено, что концентрация Cr³⁺ в электролите прямо пропорционально зависит от количества пропускаемого через него электричества. При наступлении определённых значений будет накапливаться предельное количество Cr³⁺, после чего необходимо провести корректировку на снижение концентрации путем проработки электролита при увеличенной площади анода по сравнению с катодом – в 2–3 раза больше.

Соблюдение выше указанных условий приведет к увеличению времени работы ванны хромирования и использования её с целью восстановления деталей автотранспорта. При этом будут снижаться затраты на электроэнергию при уменьшении брака с использованием разработанного холодного саморегулирующегося электролита хромирования.

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. 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. №4A. pp. 188-198.
6. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник МАДИ. 2021. №1 (64). С. 11–17.
7. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. №3 (70). С. 22–32.
8. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №3. С. 4–14.
9. Едигарян А.А., Полукаров Ю.М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Cr (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9. №3. С. 17–18.
10. Максименко С.А., Балакина О.А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3–4. С. 47–50.
11. 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 сернокислого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6. №1. С. 24–30.
13. Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Кудрявцев В.Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11. № 3. С. 31–33.
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. №317-318. pp. 612-618.
15. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020. 17(4). С. 500–511.
16. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // СБ научных трудов: Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск: НИ РХТУ, 2004. С. 44–51.
17. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Teil 11.. pp. 2888-2896.
18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. pp. 2095-2100.
19. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen Galvanotechnik. 2005. №9. Teil. 1. pp. 2063-2071.
20. Корнейчук Н.И., Ковбасюк А.В. [и др.] Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. №144. С. 17–23.
21. Аджиев, Б.У., Ващенко С.В., Соловьева З.А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №1. С. 28–31.
22. Солодкова Л.Н., Соловьева З.А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30. №10. С. 1254–1256.
23. Шлугер М.А., Ток Л.Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 32. №3. С. 297–305.
24. Зорин В.А., Штефан Ю.В., Тимченко М.И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79. № 4. С. 5–13.
25. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента // Вестник СибАДИ. 2017. 2(54). С. 90–98.
26. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск 2004. Т. 7. Спец. выпуск. Ч. 1. С. 3–11.

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.
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. vol. 1. no. 3. pp. 44-46.
3. Tkachenko I.D. i dr. *Usovershenstvovanie tehnologii hromirovanija s primeneniem neorganicheskikh i organicheskikh kompozicij* [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions] // *Razrabotka i primenienie tverdyh metallicheskih pokrytij*. Dnepropetrovsk: 1981: 223-224.
4. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *Sravnitel'naja karakteristika 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», Nauchno-informacionnyj sbornik, upravlenie»*. 2020. 7: 50-55
5. Newby Kenneth, R. *Functional chromium plating* // *Metal Finish*. 2004. 102(4A): 188-198.
6. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *Ispol'zovanie iznosostojkogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej* [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and strengthening of car parts] // *Nauchnyj recenziruemyy zhurnal "Vestnik MAD"*. 2021. 1 (64): 11-17.
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.
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.
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.
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): pp. 47-50.
11. Petrov Ju.N., Kornejchuk N.I. i dr. *Progressivnye sposoby vosstanovlenija detalej mashin i povyshenija ih prochnosti* [Progressive ways to restore machine parts and increase their strength] // *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Kishin'ov: Kishinevskij sel'skohozjajstvennyj institut im. M.V. Frunze*, 1979: 48-51.
12. Kudrjavcev V.N., Vinokurov E.G., Kuznecov V.V. *Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokislogo hroma* [Thick-layer chromium plating from electrolytes based on chromium sulfate] // *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1998. 6(1): 24-30.
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.
14. Baraldi P., Soragni E. *On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes* // *J. Alloys and Compounds*. 2001. 317-318: 612-618.
15. Kotomchin A.N., 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.
16. 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 himicheskoy tehnologii. Novomoskovsk: NI RHTU*, 2004: 44-51.
17. *Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik*. 2006. 12 (11): 2888-2896.
18. Bolch T., Linde R. u.a. *Innovative Oberflachenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren* // *Galvanotechnik*. 2005. 103: 2095-2100.
19. *Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Chromsaurelosungen Galvanotechnik*. 2005. 9(1): 2063-2071.
20. Kornejchuk N.I., Kovbasjuk A.V. i dr. *Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija* [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating] // *Trudy Kishinevskogo SHI*. 1975. 144: 17-23.
21. 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 resistance of chrome coatings] // *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992. 1(1): 28-31.
22. Solodkova L.N., Solov'eva Z.A. *Issledovanie plenki na katode pri jelektrvosstanovlenii hromovoj*

kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid] // *Jelektrohimiya*. 1994. 30. (10): 1254-1256.

23. Shluger M.A., Tok L.D. *Novye jelektrolity dlya pokrytij hromom i ego splavami* [New electrolytes for chromium and its alloys coatings] // *Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D.I. Mendeleeva*. 1988. vol. 32. no. 3. pp. 297-305.

24. Zorin, V.A., Shtefan Ju.V., Timchenko M.I. *Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnyh materialov* [Planning experiments when creating parts from composite materials] // *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018. 79(4): 5-13.

25. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. *Podbor sostavov aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov s ispol'zovaniem metoda planirovanija jeksperimenta* [Selection of activated mineral powder compositions using the experiment planning method] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2(54): 90-98

26. Vitjaz' P.A., Zhilinskij O.V., Laktjushina T.V. *Komp'yuternaja metodologija vybora tehnicheski optimal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovanija materialov* [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design] // *Fizicheskaja mezhome-hanika*. Tomsk. 2004. T. 7. Spec. vypusk. Ch. 1: 3-11.27.

27. Gorbunov I.P., Gorbunov D.I. *Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnogo hromirovanija stali*. [Mathematical modeling of the process of diffu-

sion chrome plating of steel] // *Teorija i praktika proizvodstva listovogo prokata*. *Sbornik nauchnyh trudov. Chast' 2. Lipeck: LGTU*, 2008: 68-72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» ORCID 0000-0002-4750-525, ResearcherID ABF-7049-2020 (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), (125329 г. Москва, Ленинградский пр., 64), старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко (3300, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128, e-mail: aleshka81@list.ru).

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) ORCID 0000-0002-4750-5255, ResearcherID ABF-7049-2020 (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave.), Senior Researcher of the Laboratory of the Renovation of Machinery and Equipment, T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St., e-mail: aleshka81@list.ru).

УДК 665.765

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415>

ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА

С.В. Корнеев^{1,2}, С.В. Пашукевич²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»¹;Омский государственный технический университет (ОмГТУ)²

г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из основных типов отложений в двигателе внутреннего сгорания является эмульсия или шлам, образованный водой, разложением топливных остатков и твердых остатков. Шлам обычно оседает на более холодных поверхностях двигателя, таких как дно поддона картера, клапанные камеры и верхние платы. Основная проблема состоит в том, что этот тип отложений может быть собран моторным маслом и перенесен в такие области, как масляный насос, впускной клапан или масляные каналы, где шлам может препятствовать прохождению потока масла и вызывать сбой режима смазки. Помимо нарушения в работе вышеупомянутых систем также претерпевают изменения в худшую сторону и показатели качества моторного масла.

Материалы и методы. Для контроля за состоянием моторного масла необходимо определить характеристики его работоспособности, такие как кинематическая вязкость при 40° С и при 100° С, кислотное число, щелочное число и определить количества элементов-индикаторов присадок и продуктов износа, содержащихся в моторном масле. Определение вязкости проводилось с помощью вискозиметра Stabinger SVM 3000. Он измеряет динамическую вязкость и плотность масел и топлив в соответствии с ASTM D7042 и автоматически рассчитывает кинематическую вязкость, индекс вязкости и выдает результаты измерений. Кислотное и щелочное числа определялись с помощью автоматического титратора TitroLine alpha plus, а наличие элементов-индикаторов в моторном масле с помощью оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой серии iCAP 7000, предназначенного для анализа и определения количества элементов-индикаторов в жидких и твердых образцах.

Результаты. Была проанализирована динамика изменений характеристик работоспособности моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 с увеличенным интервалом замены, которое применимо для техники, работающей в тяжёлых условиях, в зависимости от содержания воды в пробах данного смазочного материала.

Заключение. Обозначены последствия, которые могут возникнуть вследствие попадания воды в моторное масло.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторное масло, кислотное число, щелочное число, кинематическая вязкость, увеличенные интервалы замены, элементы-индикаторы продуктов износа и присадок, двигатель внутреннего сгорания, окисление моторного масла, металлические поверхности.

Поступила 06.08.21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Корнеев, С.В. Влияние воды на изменение показателей качества моторного масла / С.В. Корнеев, С.В. Пашукевич. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 406-415.

© Корнеев С.В., Пашукевич С.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415>

THE INFLUENCE OF WATER ON THE CHANGE IN ENGINE OIL QUALITY INDICATORS

Sergei V.Korneev^{1,2}, Sofia V. Pashukevich²

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)¹

Omsk State Technical University²

Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. One of the main types of deposits in an internal combustion engine is an emulsion or sludge formed by water, decomposition of fuel residues and solid residues. The sludge usually settles on the colder surfaces of the engine, such as the bottom of the crankcase pan, valve chambers and upper boards. The main problem is that this type of deposits can be collected by the engine oil and transferred to areas such as the oil pump, intake valve or oil channels, where the sludge can interfere with the flow of oil and cause a failure of the lubrication mode. In addition to the disruption in the operation of the above-mentioned systems, the engine oil quality indicators are also undergoing changes for the worse.

Materials and methods. To monitor the condition of the engine oil, it is necessary to determine the characteristics of its performance, such as: kinematic viscosity at 40 oC and at 100 oC, acid number, base number and determine the number of elements – indicators of additives and wear products contained in the engine oil. The viscosity was determined using a Stabinger SVM 3000 viscometer. It measures the dynamic viscosity and density of oils and fuels in accordance with ASTM D7042 and automatically calculates the kinematic viscosity, viscosity index and outputs the measurement results. The acid and base numbers were determined using an automatic titrator TitroLine alpha plus, and the presence of indicator elements in engine oil using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer of the iCAP 7000 series, designed for analysis and determination of the number of indicator elements in liquid and solid samples.

Results. The dynamics of changes in the performance characteristics of the Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 engine oil with an extended replacement interval, which is applicable for equipment operating in severe conditions, depending on the water content in the samples of this lubricant, was analyzed.

Conclusion. The consequences that may occur due to water entering the engine oil are indicated.

KEYWORDS: engine oil, acid number, base number, kinematic viscosity, extended replacement intervals, elements-indicators of wear products and additives, internal combustion engine, engine oil oxidation, metal surfaces.

Submitted 06.08.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Korneev S.V., Pashukevich S.V. The influence of water on the change in engine oil quality indicators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 406-415. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415>.

© Korneev S.V., Pashukevich S.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Надежность двигателя внутреннего сгорания во многом зависит от качества смазочного материала, поэтому необходимо, чтобы моторное масло непрерывно и интенсивно подводилось в зазоры в поверхностях трения сопряжённых деталей двигателя и обеспечивало достаточно прочную плёнку с высокими смазывающими свойствами для наименьшего трения и износа движущихся частей механизма. Это необходимо не только при нормальных рабочих температурах, но особенно при запуске холодного двигателя и сразу после него, когда наблюдается граничное трение, а режим смазывания происходит на пределе смазывающих свойств моторного масла [1]. Данные жесткие условия приводят к износу в несколько раз большему, чем при нормальных рабочих температурах масла, когда обеспечивается жидкостный режим смазывания [2].

Помимо смазки, моторные масла должны отводить излишки тепла, защищать поверхности от воздействия высокого давления, химического воздействия, а также сохранять чистоту внутренней части двигателя, удаляя продукты тепловой реакции окисления углеводородов моторного масла, топлива и других примесей. Высокое щелочное число способствует нейтрализации кислых агрессивных продуктов, образующихся при сгорании топлива, кроме этого, моторное масло является герметизирующим продуктом для заполнения зазора между поршневыми кольцами поршня и стенкой гильзы цилиндра так, чтобы проникновение сжатых газов и загрязняющих веществ из камеры сгорания осуществлялось в минимальных количествах.

Вода является одним из двух наиболее распространенных и разрушительных загрязняющих веществ в смазочных материалах, уступая такому загрязнителю, как твердые частицы. Ущерб от загрязнения водой не так заметен сразу, как от загрязнения твердыми частицами, но может быть более системным. Вода в смазочные материалы может поступать разными способами и будет присутствовать в них в форме растворенной, эмульгированной (суспендированной как внутренняя фаза эмульсии «вода в масле») или свободной воды, причем последние две формы представляют собой наибольшую опасность для смазываемого оборудования [3, 4, 5].

Вода является обязательным продуктом сгорания углеводородов, и выхлопные газы, образующиеся при их сгорании, попадают

через зазоры в цилиндро-поршневой группе в картер и, соответственно, в смазочные системы. Некоторые смазочные материалы достаточно гигроскопичны, чтобы поглощать водяной пар непосредственно из воздуха, а большие изменения температуры внутри системы смазки приводят к циклам перепада давления, позволяя влажному воздуху попадать в плохо герметичный масляный резервуар, в котором затем может конденсироваться влага. Кроме того, новые смазочные материалы могут быть загрязнены некоторым количеством воды, когда они поставляются производителем. Вода может присутствовать в свежем масле в результате операций по переработке, производству или смешиванию, или она может проникать в ходе транспортных процедур поставщика, методов обращения или условий хранения [6, 7, 8].

Хотя конечными проявлениями загрязнения воды в смазочных материалах являются коррозия, чрезмерный износ и преждевременный выход из строя смазываемых металлических поверхностей, это разрушение вызывается несколькими различными способами. Вода может воздействовать непосредственно на металлические поверхности, а также ухудшать эффективность смазочного материала.

Пузырьки водяного пара (или захваченного воздуха) могут вызвать микропиттинг несущих поверхностей в процессе вызванной давлением имплозии, при которой они конденсируются обратно в жидкую фазу (это известно как кавитационное повреждение). Кроме того, присутствие воды в смазочном материале может усилить захват воздуха в нем, создавая почву для еще большей кавитации. Вода может адсорбироваться непосредственно на гидрофильных металлических поверхностях, вытесняя защитный масляный слой и даже некоторые смазочные добавки. Это позволяет непосредственно подвергать незащищенную теперь металлическую поверхность воздействию агрессивных сред и твердых частиц, что приводит к интенсивному износу. Свободная вода особенно склонна к такому поведению. Другое воздействие воды на металлические поверхности известно как водородное охрупчивание. Молекулы воды могут проникать в микроскопические трещины на металлических поверхностях за счёт наличия капилляров. Оказавшись внутри микротрещин, при сочетании экстремальных давлений и контакта с поверхностью свободного металла может быть вызвано почти взрывное разложение этих молекул воды на компоненты, одним из ко-

торых является атомарный водород; водород может накапливаться в трещинах и вдоль металлических зерен, создавая давление внутри металла в условиях растягивающего напряжения и приводя к распространению трещин и последующему сколу. Кроме того, водород, находящийся в структуре металла, повышает его хрупкость, что приводит к разрушению поверхностных слоёв пар трения, даже при относительно небольших нагрузках [9, 10, 11, 12].

Неблагоприятное воздействие загрязняющей воды на сам смазочный материал может проявляться через физические, химические и микробиологические процессы. Поскольку вязкость воды не увеличивается с давлением, как у моторного масла, свободная или эмульгированная вода, содержащаяся в масле, может уменьшить эффективную вязкость масла, что приводит к недостаточной толщине эластогидродинамической пленки и недостаточной несущей способности жидкой пленки. Эта уменьшенная защита пограничного слоя может позволить металлическим поверхностям трения или скольжения вступать в прямой контакт друг с другом под высоким давлением (как при обкатке подшипников) и вызывать адгезионный износ из-за мгновенной точечной сварки контактирующих поверхностей. Общий эффект заключается в снижении несущей способности масляных пленок и снижении усталостной долговечности смазываемых поверхностей. Кроме того, точечные сварные участки обычно срезаются и добавляют к повреждающей нагрузке твердые частицы, вызывающие абразивный износ. Помимо этого, слишком тонкая масляная пленка позволяет более мелким частицам загрязнений, которые, возможно, прошли через фильтр, непосредственно соприкасаться с движущимися металлическими поверхностями, также вызывая абразивный износ. Образование эмульсий в смазочном материале может привести к образованию шлама и отложений, которые могут вызвать повышенный износ насосов и засорить отверстия, сопла, форсунки и фильтрующие элементы очистки масел [13, 14, 15, 16, 17].

Окисление углеводородов масла и попадающего топлива инициируется теплом, воздухом и давлением, возникающими в смазываемых системах; присутствие воды увеличивает скорость окисления в несколько раз, продукты окисления часто являются «кислыми» и, следовательно, естественно коррозионными. Кроме того, наличие твердых частиц вместе с загрязнением водой может ускорить скорость окис-

ления по крайней мере в 50 раз. По-видимому, содержание металлов в твердых частицах загрязняющих веществ (железо и медь) вместе с большой площадью поверхности этих частиц обеспечивает эффективное каталитическое стимулирование реакций окисления основного вещества. Такое усиление окислительных условий также истощает антиоксидантные добавки гораздо быстрее, чем это было бы в случае отсутствия загрязнителей. Исходные продукты окисления нефти, такие как карбоновые кислоты и гидропероксиды, будут реагировать дальше, что приведет к большому количеству шлама и отложений. В отличие от минеральных некоторые синтетические масла сами по себе подвержены гидролизу. Как правило, диэфиры и фосфатные эфиры особенно подвержены гидролитическому разложению, в то время как полиоловые эфиры и полиалкиленгликоли менее легко гидролизуются; полиальфаолефины (ПАО) демонстрируют лучшую устойчивость к гидролизу среди синтетических смазочных материалов [18, 19, 20, 21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для рассмотрения ситуации, при которой вода попадает в смазочный материал, были взяты моторное масло Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 и дистиллированная вода в следующих концентрациях: 1, 99 г моторного масла + 1 г воды; 2, 97 г моторного масла + 3 г воды; 3, 95 г моторного масла + 5 г воды.

Введение воды сопровождалось интенсивным перемешиванием. Допускалась погрешность концентрации воды в $\pm 0,02$ г.

После того как произошло данное смешивание, образцы в течение двух суток отстаивались в лаборатории при комнатной температуре. Результат представлен на рисунке 1.

Наглядно заметно, что наибольшая концентрация воды в моторном масле вызывает образование ярко выраженной эмульсии. Возможны три пути попадания воды в моторное масло: проникновение конденсата из воздуха; при сгорании топлива и при попадании воды из системы охлаждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кинематическая вязкость является основным физическим свойством моторного масла и считается наиболее важным аспектом при оценке масла. Загрязнение масла водой увеличивает кинематическую вязкость и ухудшает характеристики вязкости, что приводит к засорению масляного фильтра, к недостаточной смазке, к трению и износу деталей двигателя.



Рисунок 1 – Результат смешения моторного масла и воды в различных пропорциях (слева направо: +1% воды +5% воды + 3% воды)

Figure 1 – The result of mixing engine oil and water in different proportions (from left to right: +1% water +5% water + 3% water)

При увеличении концентрации воды до 3% наблюдается увеличение вязкости эмульсии, при дальнейшем увеличении концентрации воды вязкость падает. Особенности поведения воды в моторном масле заключаются в том, что при образовании эмульсии мелкие капли обволакиваются антипенной присадкой, и они не объединяются. Из-за этого вязкость повышается до достижения концентрации воды в 3%, причина – повышение сопротивления по капилляру вискозиметра (рисунок 2). При увеличении концентрации воды капли объединяются, сливаясь между собой из-за уменьшения площади, охватываемой антипенной присадкой, и это способствует снижению вязкости.

Кислотное число является мерой концентрации кислоты, присутствующей в смазочном материале. Наличие кислотного загрязнения, пакета присадок и побочных продуктов окисления определяет концентрацию кислоты в смазочном материале. При наличии в смазочном материале металлоорганических добавок, таких как диалкилдитиофосфат цинка, начальные числа нейтрализации находятся на высоком уровне. В эксплуатации проявля-

ется снижение кислотного числа на ранних стадиях из-за истощения противоизносных добавок, однако накопление кислотных загрязнений и побочных продуктов окисления в масле с течением времени всегда приводит к его увеличению. Во время продолжительного использования значение кислотного числа будет постоянно расти.

При обводнении моторного масла в процессе лабораторного исследования наблюдается снижение кислотного числа из-за их возможного растворения (кислот) в воде и выпадения в осадок (рисунок 3).

Щелочное число указывает на то, сколько остается исходных детергентно-диспергирующих присадок в масле. Это число указывает на способность масла нейтрализовать кислоты, образующиеся во время использования. Чем выше данное число в моторном масле, тем больше образовавшихся кислот оно сможет нейтрализовать во время эксплуатации.

При попадании воды щелочное число моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 уменьшается из-за образования шламов, но не так резко, как у минеральных масел (рисунок 4).

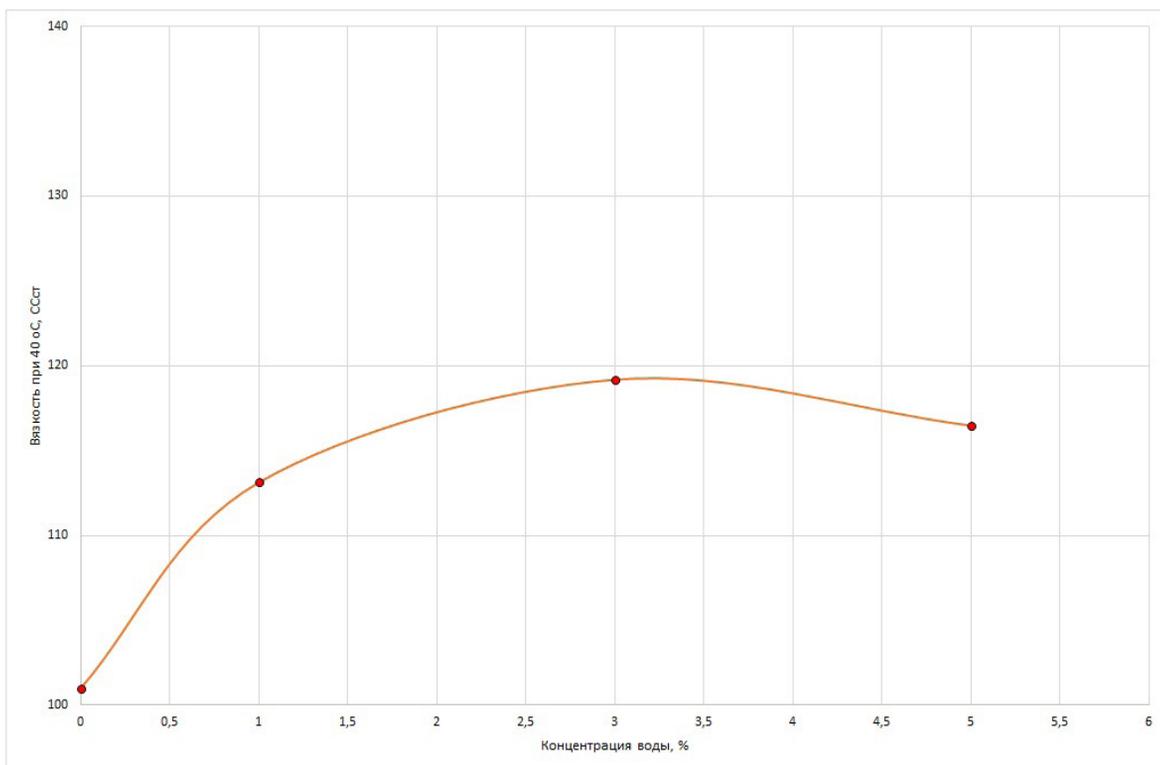


Рисунок 2 – Зависимость изменения кинематической вязкости при 40° С обводненного моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 от концентрации воды

Figure 2 – Dependence of the change in kinematic viscosity at 40o C of the watered Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 engine oil on the water concentration

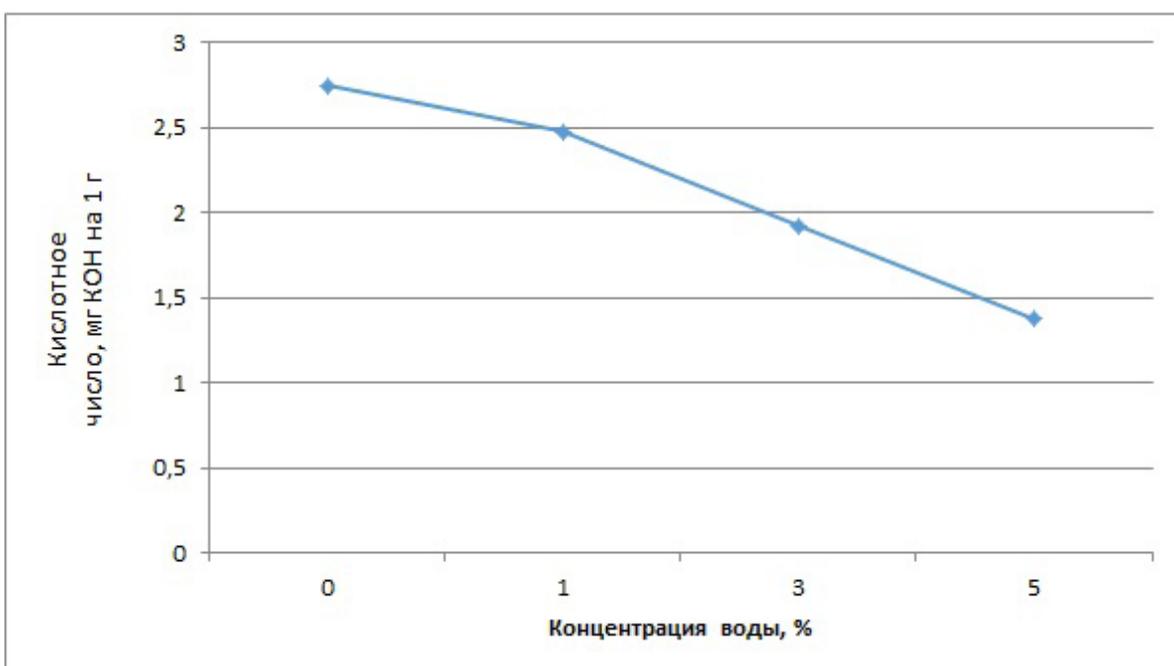


Рисунок 3 – Зависимость изменения кислотного числа обводненного свежего моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 от концентрации воды

Figure 3 – Dependence of the change in the acid number of the watered fresh Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 engine oil on the water concentration

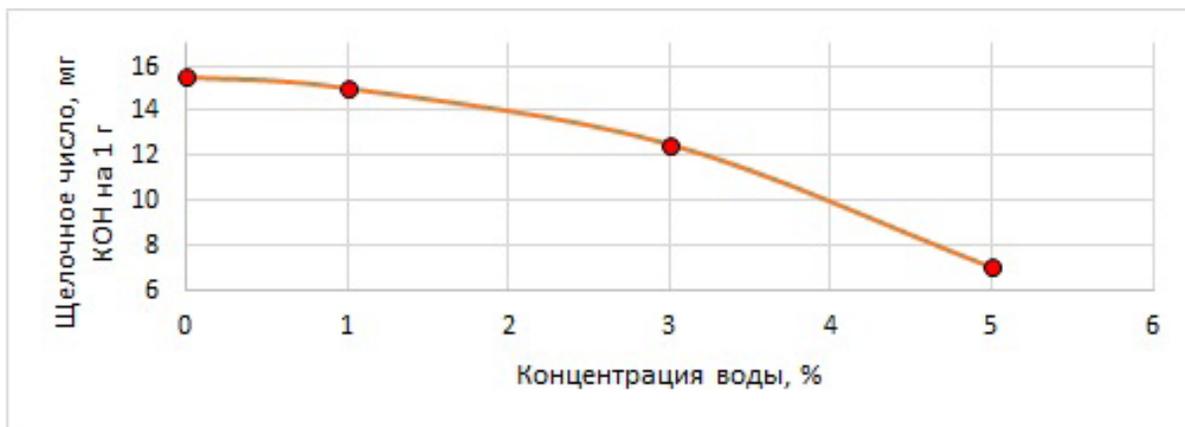


Рисунок 4 – Зависимость щелочного числа обводненного свежего моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 от концентрации воды

Figure 4 – Dependence of the alkaline number of watered fresh Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 engine oil on the water concentration

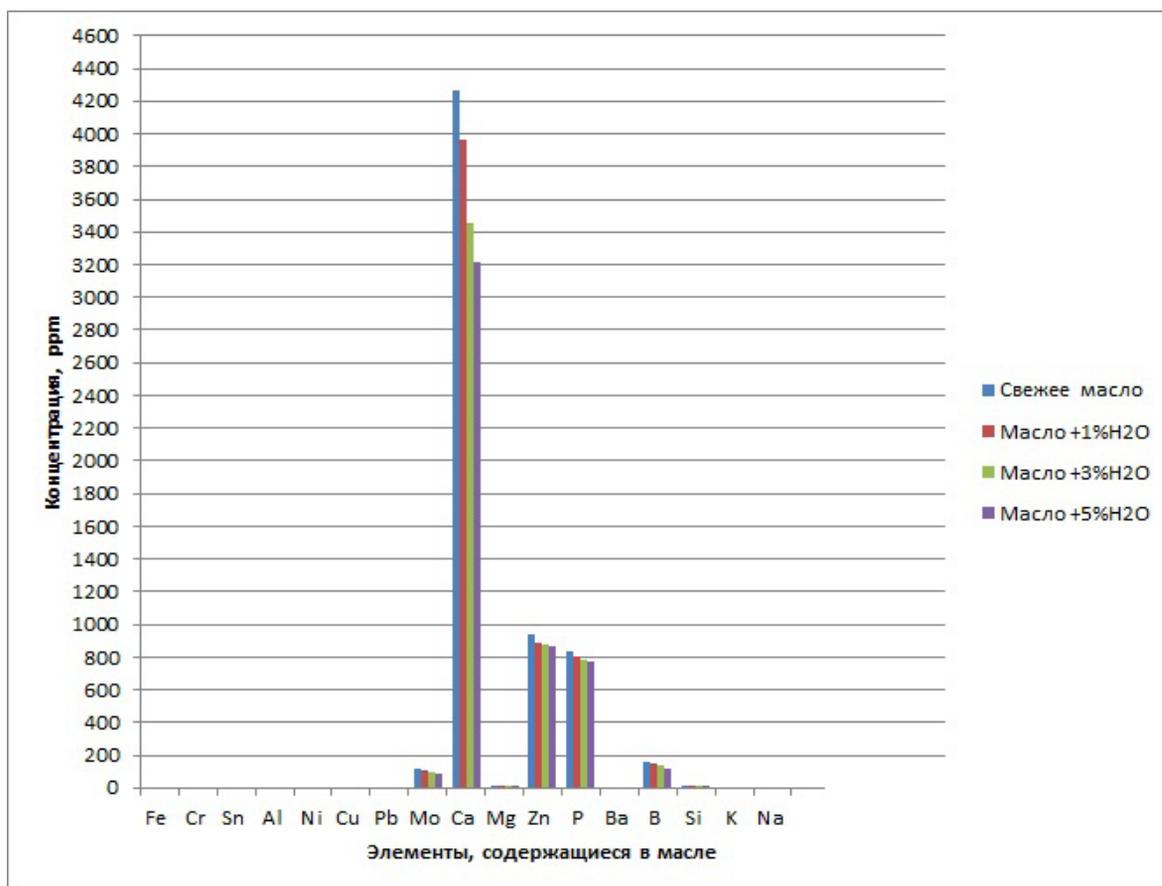


Рисунок 5 – Сравнительные диаграммы значений концентраций элементов, содержащихся в обводненном моторном масле Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40

Figure 5 – Comparative diagrams of the concentrations of elements contained in the watered engine oil Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40

Наиболее распространенные причины падения щелочного числа связаны с некачественным топливом и окислением углеводородов. Во время сгорания низкокачественного топлива с высоким содержанием серы может образовываться серная кислота, которая воздействует на моторное масло и вызывает падение щелочного числа.

Одним из наиболее эффективных способов обнаружения потенциальных отказов систем в автомобильной технике до того, как они станут слишком серьезными, является анализ металлов износа. Возможные неполадки могут быть предсказаны металлическими элементами-индикаторами продуктов износа в моторном масле (рисунок 5). Эти элементы также могут помочь идентифицировать неисправный агрегат или пару трения. Быстрое обнаружение повышенных концентраций металлов на ранней стадии имеет решающее значение для диагностики агрегатов и повышения эффективности эксплуатации техники.

Уменьшение концентрации молибдена и цинка говорит о том, что моторному маслу в связи с попаданием воды теперь несвойственно на должном уровне проявлять свои противоизносные свойства, снижение уровня кальция в моторном масле показывает снижение к устойчивости при нагреве и повышению интенсивности окисления. Снижение концентрации кальция, в свою очередь, дает понять, что моторное масло не будет, как было ранее, выполнять свою мощную функцию – убирать мелкие частицы нагара и остальные отложения с поверхностей двигателя. Падение концентрации цинка сказывается негативно на защите двигателя от коррозии, износа и задигов, но, надо отметить, что металлы в ZDDP (диалкилдитиофосфат цинка) способствуют увеличению зольности смазочного материала, что отрицательно влияет на системы двигателей. Уменьшение фосфора в моторном масле может влиять на расход топлива (возникает прирост), ухудшение противоизносных свойств, а также фосфор снижает эффективность активных каталитических центров, используемых в устройствах последующей обработки выхлопных газов. Сокращение количества бора говорит об ухудшении защиты поверхностей трения, а уменьшение кремния – о том, что в моторном масле нет следов пыли и грязи, это характерно только для масел, побывавших в эксплуатации, соответственно для них как раз и характерен прирост концентрации кремния.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Попадание воды в моторное масло носит исключительно отрицательный характер – в связи с этим могут возникать неисправности при фильтрации и систем циркуляции масла.

2. Наличие воды влечёт за собой повышение интенсивности износа и затраты мощности на трение в основных агрегатах двигателя.

3. Снижение щелочного числа (регламентировано не более чем на 50%) отражается на периодичности замены моторного масла, что негативно сказывается на экономическом эффекте автовладельца или предприятия.

4. Снижение концентрации элементов-индикаторов в моторном масле в основном влечет за собой ухудшение основных функций масла, таких как обмывание поверхностей, препятствие износу, трению и коррозии. Помимо прочего также характерен рост потребления топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Heredia-Cancino J. A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M. E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*. 2018. vol. 124, pp. 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>

2. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. vol. 129, pp.112–123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>

3. Raposo H, Farinha JT, Fonseca I, Galar D (2019) Predicting condition based on oil analysis - A case study. *Tribology International*. 2019 vol. 135. pp. 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>

4. Zzeyani S., Mikou M., Naja J., Elachhab A. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil. *Tribology International*. 2017. vol. 114, pp.27–32. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>

5. Мачехин Н.Ю., Ширлин И.И., Пашукевич С.В. Особенности эксплуатации техники при использовании высококачественных моторных масел с увеличенными интервалами замены // Вестник СибАДИ. 2019. Т.16. № 4. С. 446–454. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-4-446-454>

6. Пименов Ю.М., Улитко А.В., Середа В.А. Метод управления требованиями к эксплуатационным свойствам горюче-смазочных материалов // Химия и технология топлив и масел. 2021. № 2. С.16–24.

7. Золотов В.А. Глобальные требования к свойствам и методам испытаний моторных масел для новых двигателей // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2020. № 3. С. 42–45.

8. Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. (2019). Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*. 2019. vol. 138. pp. 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>
9. Bagi, S., Sharma, V., & Aswath, P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. vol. 136, pp. 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>
10. Li D., Kong N., Zhang Boyang, Zhang Bo, Li R., Zhang Q. Comparative study on the effects of oil viscosity on typical coatings for automotive engine components under simulated lubrication conditions. *Diamond and Related Materials*. 2021. vol.112. p.108226. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108226>.
11. Rossegger B., Eder M., Vareka M., Engelmayer M., Wimmer A. A novel method for lubrication oil consumption measurement for wholistic tribological assessments of internal combustion engines. *Tribology International*. 2021.vol. 162, p.107141. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107141>
12. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020. vol. 50. pp. 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>
13. Wang Y., Chen Y., Liang X., Tan P., Deng S. Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*. 2021. vol.225, pp.48–56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.047>
14. Tormos B., Garcia-Oliver J. M., Bastidas S., Domínguez B., Oliva, F., Cárdenas D. Investigation on low-speed pre-ignition from the quantification and identification of engine oil droplets release under ambient pressure conditions. *Measurement*. 2020. vol. 163, pp. 107961. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107961>
15. Tormos B., Novella R., Gomez-Soriano J., García-Barberá A., Tsuji N., Uehara I., Alonso M. Study of the influence of emission control strategies on the soot content and fuel dilution in engine oil. *Tribology International*. 2019. vol.136. pp.285–298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.066>
16. Петухов С.А., Муратов А.В., Курманова Л.С. Оптимизация системы смазки дизельных двигателей // Железнодорожный транспорт. 2018. № 5. С. 67–69.
17. Барыкин А.Ю., Нуретдинов Д.И., Фролов А.М., Кучев С.М. Исследование взаимосвязи эксплуатационных параметров и ресурса автомобильного двигателя // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 3. С. 43–45.
18. Антропов Б.С., Гуменный В.В., Генералов В.А. Исследование периодичности замены моторного масла на дизельных автомобилях // Вестник АПК Верхневолжья. 2019. № 2 (46). С. 79–82.
19. Прокопцова М.Д., Уханов Д.А., Глазунов И.Д. Склонность моторного масла м-10г2к к образованию низкотемпературных отложений в дизелях // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2020. № 59. С. 272–280.
20. Королев А.Е. Трение и износ двигателей при обкатке. Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 7–10.
21. Korneev S.V., Permyakov V.B., Bakulina V.D., Yarmovich Y.V., Pashukevich S.V. Influence of high temperatures on changes in the performance characteristics of motor oils when diluted with fuel. *AIP Conference Proceedings: "Oil and Gas Engineering, OGE 2020"* 2020. p. 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0026994>

REFERENCES

- Heredia-Cancino J. A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M. E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*, 2018, 124: 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>
- Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*, 2019, 129:112–123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>
- Raposo H, Farinha JT, Fonseca I, Galar D (2019) Predicting condition based on oil analysis - A case study. *Tribology International*, 2019, 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>
- Zzeyani S., Mikou M., Naja J., Elachhab A. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil. *Tribology International*, 2017. 114: 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>
- Machekhin N.Yu., Shirlin I.I., Pashukevich S.V. Osobennosti ekspluatatsii tekhniki pri ispol'zovanii vysokokachestvennykh motornyh masel s uvelichenymi intervalami zameny [Features of the operation of equipment when using high-quality engine oils with extended drain intervals]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 4: 446-454. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-4-446-454> (In Russian)
- Pimenov Yu.M., Ulitko A.V., Sereda V.A. Metod upravleniya trebovaniyami k ekspluatatsionnym svoystvam goryuche-smazochnykh materialov [Method for managing the requirements for the performance properties of fuels and lubricants]. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 2021, 2: 16-24. (In Russian)
- Zolotov V.A. Global'nye trebovaniya k svoystvam i metodam ispytaniy motornyh masel dlya novykh dvigatelej [Global requirements for the properties and test methods of motor oils for new engines]. *The world of petroleum products. Bulletin of oil companies*, 2020, 3: 42-45. (In Russian)
- Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. (2019). Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*, 2019, 138: 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>
- Bagi, S., Sharma, V., & Aswath, P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*, 2018, 136: 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>

10. Li D., Kong N., Zhang Boyang, Zhang Bo, Li R., Zhang Q. Comparative study on the effects of oil viscosity on typical coatings for automotive engine components under simulated lubrication conditions. *Diamond and Related Materials*, 2021, 112: 108226. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108226>.

11. Rossegger B., Eder M., Vareka M., Engel-mayer M., Wimmer A. A novel method for lubrication oil consumption measurement for wholistic tribological assessments of internal combustion engines. *Tribology International*, 2021, 162: 107141. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107141>

12. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine, *Transportation Research Procedia*, 2020, 50: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>

13. Wang Y., Chen Y., Liang X., Tan P., Deng S. Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*, 2021, 225: 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.combust-flame.2020.10.047>

14. Tormos B., Garcia-Oliver J. M., Bastidas S., Domínguez B., Oliva, F., Cárdenas D. Investigation on low-speed pre-ignition from the quantification and identification of engine oil droplets release under ambient pressure conditions. *Measurement*. 2020, 163: 107961. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107961>

15. Tormos B., Novella R., Gomez-Soriano J., García-Barberá A., Tsuji N., Uehara I., Alonso M. Study of the influence of emission control strategies on the soot content and fuel dilution in engine oil. *Tribology International*, 2019, 136: 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.066>

16. Petukhov S.A., Muratov A.V., Kurmanova L.S. Optimizaciya sistemy smazki dizel'nyh dvigatelej [Optimization of the diesel engine lubrication system]. *Zheleznodorozhnyj transport*, 2018, 5: 67-69.

17. Barykin A.Yu., Nuretdinov D.I., Frolov A.M., Kuchev S.M. Issledovanie vzaimosvyazi ekspluatacionnyh parametrov i resursa avtomobil'nogo dvigatelya [Investigation of the relationship between operational parameters and the resource of an automobile engine], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2019, 3: 43-45.

18. Antropov B.S., Gumennyj V.V., Generalov V.A. Issledovanie periodichnosti zameny motornogo masla na dizel'nyh avtomobilyah [Investigation of the frequency of replacement of engine oil on diesel vehicles], *Vestnik APK Verhnevolzh'ya*, 2019, 2: 79-82.

19. Prokopcova M.D., Uhanov D.A., Glazunov I.D. Sklonnost' motornogo masla m-10g2k k obrazovaniyu nizkotemperaturnyh otlozhenij v dizelyah [The tendency of m-10g2k engine oil to form low-temperature deposits in diesel engines], *Trudy 25 GosNII MO RF*, 2020, 59: 272-280.

20. Korolev A.E. Trenie i iznos dvigatelej pri obkatke [Engine friction and wear during running-in], *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, 2020, 9: 7-10.

21. Korneev S.V., Permyakov V.B., Bakulina V.D., Yarmovich Y.V., Pashukevich S.V. Influence of high temperatures on changes in the performance characteristics of motor oils when diluted with fuel. *AIP Conference Proceedings: "Oil and Gas Engineering, OGE 2020"* 2020. p. 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0026994>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Сергей Васильевич Корнеев – 50%

София Вячеславовна Пашукевич – 50%

AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei V. Korneev - 50%

Sofia V. Pashukevich - 50%

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» ФГБОУ ВО «СибАДИ»; проф. кафедры «Химия и химическая технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ); ORCID: 0000-0002-7243-1841 e-mail: svkorneev51@mail.ru

Пашукевич София Вячеславовна – аспирант группы Ма – 202 кафедры «Химия и химическая технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ). ORCID: 0000-0002-8111-4725 e-mail: sofia96@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Korneev – Dr. of Sci., Professor of the Thermal Engines and Tractor Electrical Equipment Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); Professor of the Chemistry and Chemical Technology Department, Omsk State Technical University; ORCID: 0000-0002-7243-1841 e-mail: svkorneev51@mail.ru.

Sofia V. Pashukevich – Postgraduate student of the Chemistry and Chemical Technology Department, Omsk State Technical University; ORCID: 0000-0002-8111-4725 e-mail: sofia96@bk.ru.

УДК 656.071.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-416-426>

УКРУПНЁННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНА В КАДРАХ С ПРОФИЛЬНЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ

Н.Н. Якунин, О.Ю. Фролов, Н.В. Якунина, В.В. Котов
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
г. Оренбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующая методология подготовки кадров определяет требования к компетенциям будущих специалистов, но методики определения количества подготавливаемых кадров либо базируются на подготовленности образовательных учреждений к качественному ведению образовательного процесса, либо ограничиваются уровнем автотранспортного предприятия и не учитывают региональные потребности рынка труда. Система подготовки кадров для регионального автотранспортного комплекса разбалансирована по отношению к потребностям данного комплекса. Этим обусловлена актуальность разработки укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона (АТКР) в кадрах с профильным образованием.

Материалы и методы. В работе использован метод анкетирования хозяйствующих субъектов, осуществляющих автотранспортную деятельность не только в качестве основной направленности, но и в качестве вспомогательной. Анкетирование направлено на определение количества работников автотранспортных предприятий и подразделений различных отраслей с учётом уровня профильного образования. В работе использованы положения теории технической эксплуатации автомобилей и методы математической статистики.

Результаты. Основным результатом работы является укрупнённая методика определения потребности автотранспортного комплекса в кадрах с профильным образованием, отличающаяся от известных тем, что учитывает количественные характеристики персонала с учётом уровня образования в хозяйствующих субъектах региона различных организационно-правовых форм. Эти результаты представляют научную новизну исследования. Определены структурные характеристики персонала, разработан соответствующий алгоритм. Приведены сравнительные значения производительности труда специалистов с профильным автотранспортным образованием.

Обсуждение и заключение. Разработан методический инструментарий определения потребности автотранспортного комплекса региона в кадрах с профильным образованием, позволяющий преодолеть сложившуюся разбалансированность между системой подготовки кадров для регионального автотранспортного комплекса и потребностями этого комплекса. Применение результатов работы позволит повысить обоснованность государственного задания на подготовку кадров автотранспортного профиля в регионах, повысить эффективность использования бюджетных средств и средств населения на образовательную деятельность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, кадровое обеспечение, потребность транспортного комплекса региона в трудовых ресурсах.

Поступила 12.07.21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Якунин Н.Н. Укрупнённая методика определения потребности автотранспортного комплекса региона в кадрах с профильным образованием / Н.Н. Якунин, О.Ю. Фролов, Н.В. Якунина, В.В. Котов. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-416-426> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 416-426.

© Якунин Н.Н., Фролов О.Ю., Якунина Н.В., Котов В.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-416-426>

AGGREGATED METHODOLOGY FOR DETERMINING HUMAN RESOURCES NEEDS OF THE ROAD TRANSPORT SECTOR IN THE REGION WITH SPECIALIZED EDUCATION

Nikolay N Yakunin, Oleg U. Frolov, Natalia V. Yakunina, Vitaly V. Kotov
Orenburg State University,
Orenburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The existing methodology of personnel training determines the requirements for the competencies of future specialists, but the methods for determining the number of trained specialists are based either on the readiness of educational institutions for the quality management of the educational process, or are limited to the level of a motor transport enterprise, and do not take into account the regional needs of the labor market. The system of personnel training for the regional road transport complex is unbalanced in relation to the needs of this complex. This is due to the urgency of developing an enlarged methodology for determining the needs of the region's motor transport complex (ATCR) in specialists with specialized education.*

Materials and methods. *The paper uses the method of questioning economic entities engaged in road transport activities not only as the main focus, but also as an auxiliary one. The survey is aimed at determining the share of employees of motor transport enterprises and departments of various industries, taking into account the level of specialized education. The provisions of the theory of technical operation of cars and methods of mathematical statistics are used in the work.*

Results. *The main result of the work is an enlarged methodology for determining the needs of the motor transport complex for specialists with specialized education, which differs from the known ones in that it takes into account the quantitative characteristics of personnel, taking into account the level of education in the economic entities of the region of various organizational and legal forms. These results represent the scientific novelty of the study. The structural characteristics of the personnel are determined, the corresponding algorithm is developed. The comparative values of labor productivity of specialists with specialized motor transport education are given.*

Discussion and conclusions. *The methodological tools for determining the needs of the regional motor transport complex in specialists with specialized education have been developed, which allows overcoming the existing imbalance between the system of personnel training for the regional motor transport complex and the needs of this complex. The application of the results of the work will increase the validity of the state task for the training of specialists in the motor transport profile in the regions, increase the efficiency of using budget funds and public funds for educational activities.*

KEYWORDS: *automobile transport, personnel support of automobile transport, characteristics of personnel support, the need of the transport complex for labor resources.*

Submitted 12.07.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Yakunin N.N., Frolov O.U., Yakunina N.V., Kotov V.V. Aggregated methodology for determining human resources needs of the road transport sector in the region with specialized education. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (4): 416-426. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-416-426>.

© Yakunin N.N., Frolov O.U., Yakunina N.V., Kotov V.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Успешная деятельность любой отрасли народного хозяйства определяется состоянием кадрового обеспечения. Отрасль автомобильного транспорта не является исключением. Готовить высококвалифицированные кадры предоставлено системе среднего и высшего профессионального образования. Существующая методология подготовки кадров определяет требования к компетенциям будущих специалистов, но методики определения количества подготавливаемых специалистов базируются либо на подготовленности образовательных учреждений к качественному ведению образовательного процесса, либо на потребности автотранспортных предприятий в таких специалистах. Эти методики не учитывают региональные потребности рынка труда, а следовательно, не могут объективно определять запрос автотранспортной общественности на подготовку кадров. В таком случае система подготовки кадров для регионального автотранспортного комплекса становится разбалансированной по отношению к потребностям этого комплекса. Проблема усложняется ещё и тем, что существующие официальные статистические данные не отражают деятельность автотранспортных подразделений промышленных, сельскохозяйственных и других предприятий, в которых автомобильный транспорт носит вспомогательную функцию, но которые также нуждаются в специалистах автотранспортного профиля. Этими обстоятельствами обусловлена актуальность разработки укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона в специалистах с профильным образованием.

Роль специалистов на автомобильном транспорте обусловлена потребностью в обеспечении высокого уровня безопасности. В настоящее время образовательная сфера осуществляет подготовку выпускников различного уровня. Это среднее специальное образование, высшее (бакалавриат, специалитет, магистратура). Специалисты всех этих уровней задействованы в организации процесса перевозок, осуществлении готовности транспортных средств и организации безопасности их движения. Изучив федеральную и региональ-

ные нормативные базы, установлено, что план набора абитуриентов на обучение различного уровня не отражает реальной ситуации в экономике транспорта. Ежегодный набор и, как следствие, выпуск специалистов не обусловлен реальной потребностью работодателей в различных регионах. В нормативной базе расчёт контрольных цифр приёма изложен в Приказе Министерства науки и высшего образования №550 от 3 апреля 2020 г.¹:

$$Z_{ij} = \max \left\{ \begin{array}{l} KЦ(пр)_{ij} \cdot (1 + T_j) \\ KЦ(пр)_{ij} + РГ_j \end{array} \right. , \quad (1)$$

где Z_{ij} – предельное значение для предложенной i -й образовательной организации по установлению контрольных цифр приёма (максимальное значение) по j -й УГСН (НПС);

$KЦ(пр)_{ij}$ – количество контрольных цифр приёма, установленных для i -й образовательной организации по j -й УГСН (НПС) на год, предшествующий году, в котором проводится конкурс;

T_j – предельный темп прироста предложенных, содержащийся в заявке;

$РГ_j$ – расчётный размер группы обучающихся для j -й УГСН (НПС), устанавливаемый в объявлении конкурса в целях расчёта предельных значений образовательных организаций по установлению контрольных цифр приёма.

Кроме того, актуальность оценки фактического состояния кадрового обеспечения автотранспортной деятельности обуславливается необходимостью формирования контингента обучающихся по программам направления подготовки специалистов «Техника и технология наземного транспорта». Без такой оценки отсутствует понимание в потребности подготовки специалистов в различных административно-территориальных образованиях страны.

Компетентность персонала, его способность к созданию условий для устойчивого развития, осуществлению основной и вспомогательной деятельности являются условиями успешного развития. Среди научных и методических трудов существуют такие, которые направлены на совершенствование управления

¹ Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №550 от 3 апреля 2020 г. «Об утверждении Порядка проведения конкурса на распределение контрольных цифр приёма по специальностям и направлениям подготовки и (или) укрупнённым группам специальностей и направлений подготовки для обучения по образовательным программам высшего образования за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета».

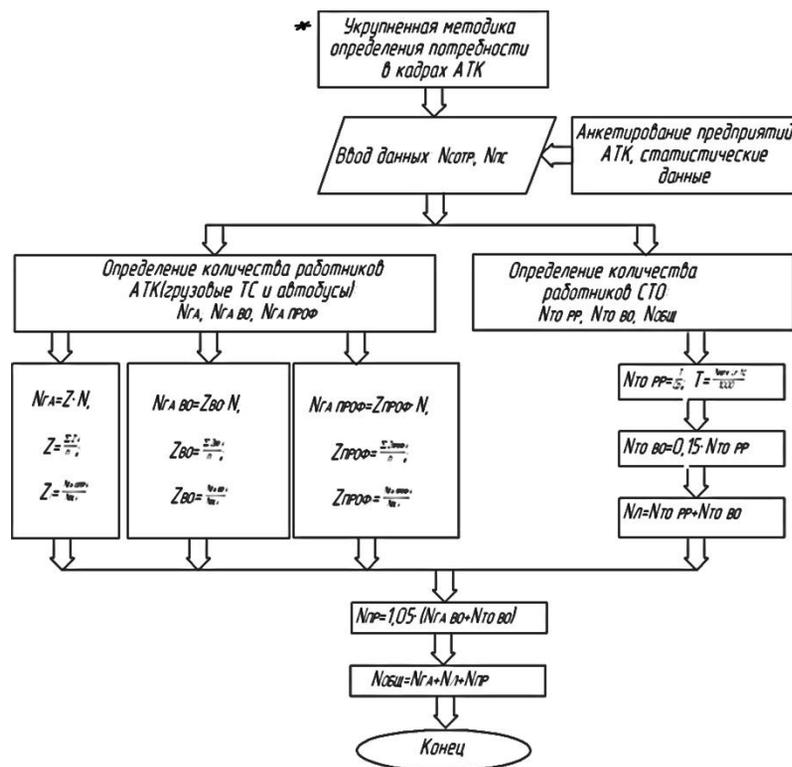


Рисунок 1 – Алгоритм реализации укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона в трудовых ресурсах

Figure 1 – Algorithm of implementation of an aggregated methodology for determining the labour requirements of the road transport sector in the region

производительностью труда на автомобильном транспорте². Известны работы, в которых изучено влияние персонала и его квалификации на процесс производства [1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], в том числе работы, в которых отражен опыт ведущих экономик мира [5, 6]. В этих работах отмечается влияние структуры экономической деятельности в регионах страны на характеристики автотранспортных предприятий, среди которых наибольшее внимание уделено количеству таких предприятий, количеству и типоразмеру автомобилей в их составе и другим показателям. При этом характеристики персонала предлагают определять по методикам, не учитывающим произошедшие изменения экономических отношений в стране, технические, технологические и организационные новации, вызванные научно-техническим прогрессом. Остаются неизученными зависимости количества персонала автотранспортной деятельности от количества автотранспортных средств.

Целью работы является научное обоснование потребности в профессиональных кадрах автотранспортного комплекса региона. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить количественные характеристики персонала автотранспортного комплекса с учётом уровня образования в хозяйствующих субъектах региона с различными организационно-правовыми формами.
2. Разработать алгоритм определения потребности в трудовых ресурсах на автотранспортном комплексе региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм реализации укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона в трудовых ресурсах приведён на рисунке 1.

Основным признаком методики является базирование расчётов на количестве грузовых и пассажирских автотранспортных средств в

²Бронштейн Л.А. Экономика автомобильного транспорта: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». М.: Транспорт. 1976. 349 с.

регионе. Значения этих показателей отражены в статистических данных, что существенно упрощает применение методики. Укрупнённо методика состоит из следующих блоков:

1. Анкетирование предприятий автотранспортного комплекса региона для определения значений показателей, используемых для расчётов количества работников АТКР с различным уровнем профильного образования.

2. Определение количества работников грузового и пассажирского коммерческого автотранспортного комплекса с использованием значений показателей по пункту 1.

3. Определение количества работников станций технического обслуживания легковых автомобилей с использованием значений показателей по пункту 1.

4. Определение общего количества работников автотранспортного комплекса региона, в том числе с профильным автотранспортным образованием, и их долей в составе трудоспособного населения региона.

5. Определение показателей производительности труда персонала с профильным автотранспортным образованием.

Исследования выполнены на примере Оренбургской области. Общий парк N автобусов и грузовых автомобилей в Оренбургской области по состоянию на 2018 г. составил 136,7 тыс. шт., что является 13 местом по Российской Федерации и 3 местом среди регионов Приволжского федерального округа³.

Для определения долей работников АТКР с различным уровнем профильного образования, осуществляющих свою трудовую деятельность на предприятиях, занимающихся грузовыми и пассажирскими перевозками, использован метод анкетирования. В анкете предлагалось указать сведения о количестве подвижного состава, общем количестве сотрудников автотранспортного предприятия (АТП), количестве сотрудников с профильным автотранспортным образованием (среднее специальное образование, бакалавриат, специалитет и магистратура). В опросе участвовали 60 предприятий Оренбургской области, среди которых 30 предприятий имели организационно-правовую форму юридического лица и 30 – индивидуальных предпринимателей. Основной вид деятельности этих предприятий – услуги по перевозке пассажиров автобусами, грузов грузовыми автомобилями,

прицепами и полуприцепами. Опрос проходил анонимно, без указания наименования юридического лица и индивидуального предпринимателя. После обработки результатов анкетирования построена диаграмма распределения численности сотрудников АТП по уровням образования (рисунок 2).

Количество работников $N_{\text{общ}}$ автотранспортного комплекса в субъектах РФ в укрупнённом виде определяют по зависимости

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{ГА}} + N_{\text{Л}} + N_{\text{ПП}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ГА}}$ – количество работников автотранспортного комплекса, задействованных на предприятиях, занимающихся грузовыми и пассажирскими перевозками, чел.;

$N_{\text{Л}}$ – количество работников автотранспортного комплекса, задействованных на станциях технического обслуживания легковых автомобилей, чел.;

$N_{\text{ПП}}$ – количество прочих работников сферы автомобильного транспорта, не учтённых в первой и второй группах (5% от их общего количества), чел.

Количество работников $N_{\text{ГА}}$ автотранспортного комплекса, задействованных на предприятиях, занимающихся грузовыми и пассажирскими перевозками.

Методы математической статистики, положения теории технической эксплуатации автомобилей использованы в настоящей работе в качестве основных. Для определения количества работников $N_{\text{ГА}}$ проведено анкетирование, описанное выше.

В работе использованы следующие показатели.

Количество Z сотрудников АТП, приходящихся на единицу подвижного состава АТП:

$$z = \frac{N_{\text{сотр}}}{N_{\text{пс}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{сотр}}$ – общее количество сотрудников АТП, чел.;

$N_{\text{пс}}$ – количество подвижного состава АТП, шт.

Количество $z_{\text{во}}$ специалистов с высшим образованием в АТП, приходящихся на единицу подвижного состава:

$$z_{\text{во}} = \frac{N_{\text{сотр во}}}{N_{\text{пс}}}, \quad (4)$$

³ Федеральная служба государственной статистики. Режим доступа – <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (дата обращения: 24.11.2020)

Распределение количества сотрудников АТП с профильным образованием в перспективе на 2030й год

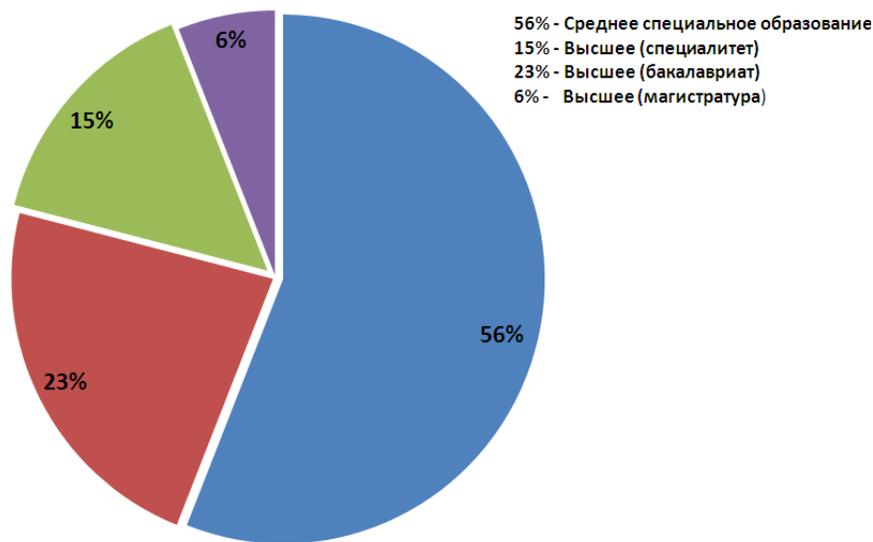


Рисунок 2 – Распределение количества сотрудников АТП по уровню образования

Figure 2 – Distribution of the number of ATP employees by education level

где $N_{\text{СОТР ВО}}$ – количество сотрудников АТП, имеющих высшее образование, чел.

Количество $Z_{\text{ПРОФ}}$ специалистов с профильным автотранспортным образованием в АТП, приходящихся на единицу подвижного состава:

$$Z_{\text{ПРОФ}} = \frac{N_{\text{ПРОФ}}}{N_{\text{ПС}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{ПРОФ}}$ – количество специалистов с профильным автотранспортным образованием в АТП, чел.

Количество работников автотранспортного комплекса в регионе, задействованных на предприятиях, занимающихся грузовыми и пассажирскими перевозками, определено по зависимости

$$N_{\text{ГА}} = M \cdot N, \quad (6)$$

где M – математическое ожидание количества Z сотрудников АТП, приходящихся на единицу подвижного состава, чел/шт.;

N – парк автобусов и грузовых автомобилей в Оренбургской области, шт.

Аналогично зависимости (6) определяется количество $N_{\text{ГА ВО}}$ специалистов с высшим образованием, работающих в автотранспортном комплексе в регионе, и количество $N_{\text{ГА ПРОФ}}$ специалистов с профильным автотранспортным образованием в регионе.

Количество работников $N_{\text{Л}}$ автотранспортного комплекса, задействованных на станциях технического обслуживания легковых автомобилей.

Трудоёмкость работ $T_{\text{ТО-ТР}}$ по техническому обслуживанию и ремонту легковых автомобилей⁴, зарегистрированных в регионе:

$$T_{\text{ТО-ТР}} = \frac{N_{\text{ЛЕГК}} \cdot L_{\text{Г}} \cdot t_{\text{с}}}{1000}, \quad (7)$$

где $N_{\text{ЛЕГК}}$ – численность легковых автомобилей в регионе, шт.;

$L_{\text{Г}}$ – среднегодовой пробег одного легкового автомобиля, км;

$t_{\text{с}}$ – поправочный коэффициент (для легковых автомобилей – 2.7).

Количество ремонтных рабочих $N_{\text{ТО,РР}}$ по техническому обслуживанию и ремонту легковых автомобилей определено по зависимости

⁴ Масуев М.А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия». 2007. 244 с.

$$N_{TO.PP} = \frac{T_{TO-TP}}{C_P}, \quad (8)$$

где C_P – годовой фонд времени одного штатного рабочего (равен 1832 ч), ч.

Количество $N_{TO.BO}$ специалистов с высшим образованием, задействованных в системе технического обслуживания и ремонта легковых автомобилей, составляет от 10 до 20% от количества ремонтных рабочих $N_{TO.PP}$ по техническому обслуживанию и ремонту. Принимаем, что

$$N_{TO.BO} = 0,15 \cdot N_{TO.PP}, \quad (9)$$

а общее количество работников N_L автотранспортного комплекса, задействованных на станциях технического обслуживания легковых автомобилей, определено по зависимости

$$N_L = N_{TO.BO} + N_{TO.PP}. \quad (10)$$

Количество $N_{OBSH.BO}$ специалистов с высшим образованием в регионе, не учтённых в первой и второй группах,

$$N_{OBSH.BO} = 1,05 \cdot (N_{GABO} + N_{TO.BO}). \quad (11)$$

Долю работников P автомобильного транспорта в общей структуре трудоспособного населения в Оренбургской области определяют по зависимости

$$P = \frac{N_{OBSH}}{Q} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где Q – трудоспособное население.

В Оренбургской области трудоспособное население в 2018 г. составило 1 206 375 чел.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчёты согласно приведённой методике указывают на то, что потребное количество сотрудников с профильным образованием для автотранспортного комплекса Оренбургской

области составляет 10 936 чел. С учётом этого необходимо определять направления подготовки трудовых ресурсов.

При проведении расчёта по формуле (3) получено, что на одну единицу транспортного средства грузовых автомобилей и автобусов приходится 2,02 сотрудников автотранспортных предприятий региона. При количестве автобусов и грузовых автомобилей в Оренбургской области, равному 136,7 тыс. шт., в АТКР Оренбургской области должны быть задействованы 276,1 тыс. кадровых работников ($N_{ГА}$).

Согласно имеющимся статистическим сведениям численность легковых автомобилей, зарегистрированных на территории Оренбургской области, составляет 716,7 тыс. шт.⁵, среднегодовой пробег легкового автомобиля на территории Оренбургской области составляет 16 тыс. км⁶, следовательно, трудоёмкость работ по техническому обслуживанию и ремонту парка легковых автомобилей T_{TO-TP} рассчитанная по формуле (7), составит 30 961 440 нормо-часов⁷. Расчётное количество ремонтных рабочих автотранспортного комплекса региона, задействованных на станциях технического обслуживания легковых автомобилей с учётом годового фонда рабочего времени по формуле (8) составит 16,9 тыс. чел.

Общее число работников, задействованных в автотранспортном комплексе региона с учётом формул (10) и (11), составляет 307,7 тыс. чел. *Потребное количество сотрудников с профильным образованием для автотранспортного комплекса Оренбургской области составляет 10 936 чел.*

Проверка достоверности расчетов численности работников автомобильного транспорта с автотранспортным образованием по разработанной методике производилась по имеющейся методике, изложенной в источнике⁸, из которой следует, что численность руководителей, специалистов и служащих автотранспортных объединений и предприятий определяется по зависимостям:
общее руководство:

⁵ Федеральная служба государственной статистики. Режим доступа – <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (дата обращения: 24.11.2020).

⁶ Положение Центрального Банка Российской Федерации №432-П от 19 сентября 2014 г. «О единой методике определения размера расходов на восстановительный ремонт в отношении поврежденного транспортного средства».

⁷ Масуев М.А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия». 2007. 244 с.

⁸ Нормативы численности руководителей, специалистов и служащих автотранспортных объединённых предприятий. М.: Экономика. 1990. 35 с.

$$N_{ч1} = 0,2924 \cdot x_1^{0,0899} \cdot x_3^{0,2949}, \quad (13)$$

материально-техническое снабжение:

$$N_{ч5} = 0,00011 \cdot x_1^{1,1730} \cdot x_4^{1,0550}, \quad (14)$$

комплектование и подготовка кадров:

$$N_{ч5} = 0,00011 \cdot x_1^{1,1730} \cdot x_4^{1,0550}, \quad (15)$$

эксплуатационная служба:

$$N_{ч6} = 0,0198 \cdot x_3^{0,7234}, \quad (16)$$

техническая служба:

$$N_{ч9} = 0,11 \cdot x_1^{0,5477} \cdot x_5^{0,3}, \quad (17)$$

где x_1 – количество автомобилей в регионе, шт.;

x_2 – коэффициент выпуска автомобилей на линию;

x_3 – среднесписочная численность работающих, чел.;

x_4 – режим работы автомобилей, ч;

x_5 – нормативная численность рабочих по ремонту автомобилей, чел.

Применив указанную методику с использованием имеющихся значений x_1 - x_5 , построены зависимости показателя $Z_{\text{ПРОФ}}$ от численности подвижного состава по показателям, полученным по разработанной методике и показателям нормативов из известной методики. Полученные зависимости представлены на рисунке 3, где нижняя сплошная линия – зависимость показателя $Z_{\text{ПРОФ}}$ от численности подвижного состава по предлагаемой методике.

По имеющейся методике на 100 автомобилей приходится 10,7 сотрудников с профильным образованием, по разработанной методике на 100 автомобилей приходится 8,6 сотрудников. Увеличение производительности труда персонала с профильным автотранспортным образованием около 20%.

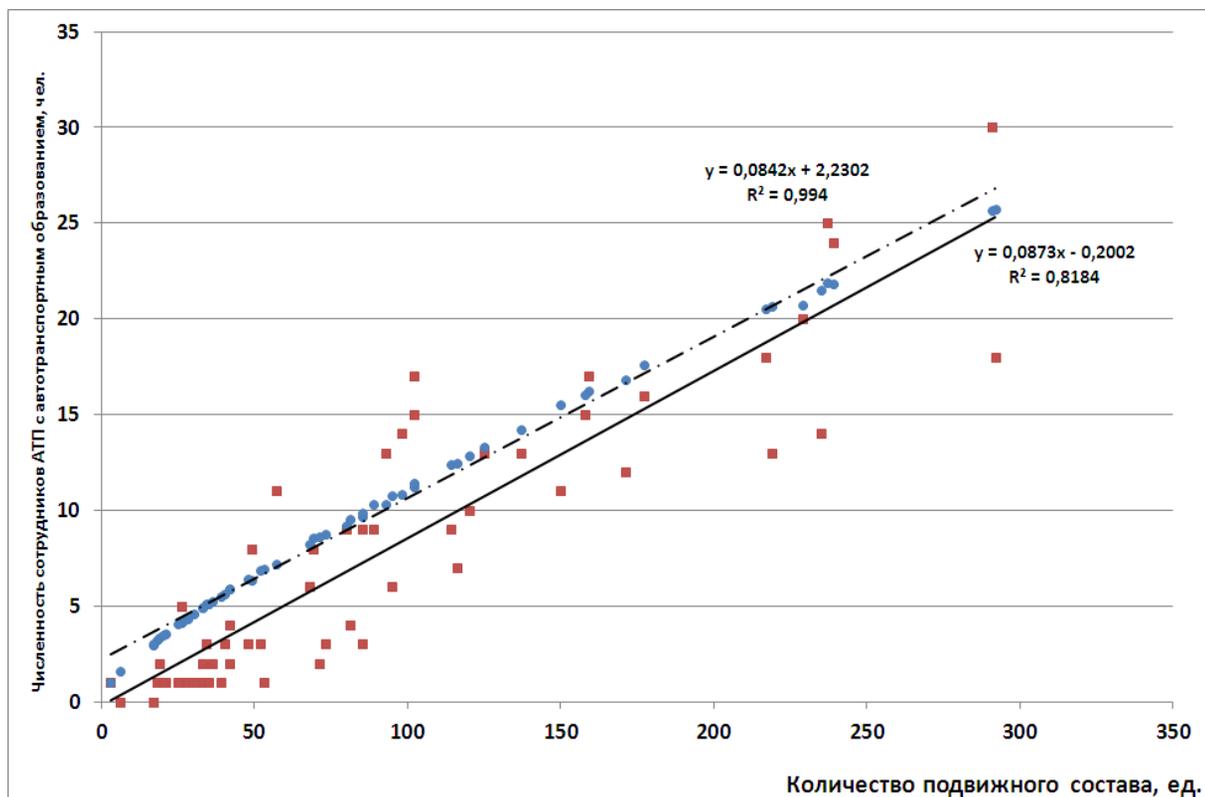


Рисунок 3 – Сравнение зависимостей показателя численности сотрудников АТП с автотранспортным образованием от количества подвижного состава по имеющейся и разработанной методике

Figure 3 – Comparison of the dependencies of the number of employees of a road transport operator with road transport education on the number of rolling stock using the existing and the developed methodology

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена актуальная научно-практическая задача, основным результатом которой является укрупнённая методика определения потребности автотранспортного комплекса в кадрах с профильным образованием, отличающаяся от известных тем, что учитывает количественные характеристики персонала с учётом уровня образования в хозяйствующих субъектах региона различных организационно-правовых форм. Эти результаты представляют научную новизну исследования. Определены структурные характеристики персонала, разработан соответствующий алгоритм. Приведены сравнительные значения производительности труда кадров с профильным автотранспортным образованием. На основании полученных результатов можно утверждать о повышении производительности труда сотрудников с профильным автотранспортным образованием в настоящее время по сравнению с расчётами по существующей методике. Увеличение составило около 20%.

Разработанный методический инструментарий позволяет преодолеть сложившуюся разбалансированность между системой подготовки кадров для регионального автотранспортного комплекса и потребностями этого комплекса. Применение результатов работы позволит повысить обоснованность государственного задания на подготовку кадров автотранспортного профиля в регионах, повысить эффективность использования бюджетных средств и средств населения на образовательную деятельность. По имеющейся методике на 100 автомобилей приходится 10,7 сотрудников с профильным образованием, по разработанной методике на 100 автомобилей приходится 8,6 сотрудников. Увеличение производительности труда персонала с профильным автотранспортным образованием около 20%. *Потребное количество сотрудников с профильным образованием для автотранспортного комплекса Оренбургской области составляет 10 936 чел.* С учётом этого необходимо определять направления подготовки трудовых ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлев П.В. Мировой опыт в управлении персоналом. Обзор зарубежных источников: монография. Екатеринбург : Деловая книга. 2008. 232 с.
2. Иванов О. Современный формат оценки персонала // Персонал-Микс. 2009. №4. С.78–81.
3. Ищенко С.Д. Определение стратегического

направления в работе с персоналом на основе анализа служебного поведения // Управление персоналом. 2011. №11. С.24–30.

4. Zhao, TR (Zhao Tianran) *Study of Human Resource Management Benefits* HUMAN RESOURCES MANAGEMENT IN THE KNOWLEDGE ECONOMY ERA, VOLS I AND II, Univ Jinan, Jinan, PEOPLES R CHINA OCT 24-25, pp. 947-952 (2009)

5. Sojka, L (Sojka, Ladislav), *Trends and Challenges in Human Resources Management in the New Millennium*, MANAGEMENT 2016: INTERNATIONAL BUSINESS AND MANAGEMENT, DOMESTIC PARTICULARITIES AND EMERGING MARKETS IN THE LIGHT OF RESEARCH, 6th International Scientific Conference on International Business and Management, Domestic Particularities and Emerging Markets in the Light of Research, SLOVAKIA, SEP 29-OCT 02, 2016, Pages 162-168.

6. Strohmeier, S (Strohmeier, Stefan), *Digital human resource management: A conceptual clarification*, GERMAN JOURNAL OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT-ZEITSCHRIFT FUR PERSONALFORSCHUNG, Volume 34, Issue 3, Pages 345-365.

7. Meirinhos, VA (Meirinhos, Viviana Andrade) Couto, AI (Couto, Ana Isabel) *Societal Human Resources Management and Development*, INNOVATION MANAGEMENT AND EDUCATION EXCELLENCE VISION 2020: FROM REGIONAL DEVELOPMENT SUSTAINABILITY TO GLOBAL ECONOMIC GROWTH, VOLS I – VI, 27th International Business Information Management Association Conference, Milan, ITALY, MAY 04-05, 2016, pp. 1584-1587

8. Якунина Н.В., Якунин Н.Н., Меньших О.М., Грибков К.В. Влияние состояния организационно-технологической системы на безопасность перевозок пассажиров автомобильным транспортом // Автомобильная промышленность. 2018. №1. С.20–24.

9. Фролов О.Ю., Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Постников А.А. Методика прогнозирования количества автотранспортных средств в регионе: материалы Международной научно-практической конференции «Наука России: цели и задачи». Екатеринбург : 2021. С. 118–121.

10. Yakunin, N (Yakunin Nikolay), Yakunina, N (Yakunina Natalya), Kotov, V (Kotov Vitaliy), Kabanova, O (Kabanova Olga) Staffing analysis of the regional motor transport complex (by the case of the Orenburg region), The VII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Management of Transport Systems" (ITMTS 2021), MATEC Web Conf., Volume 341, 2021.

11. Rogov, AA; Serebryakova, OI and Makarova, MA Quality Management of the Megacities Transport Hubs Development, Design and Construction PROCEEDINGS OF THE 2019 IEEE CONFERENCE OF RUSSIAN YOUNG RESEARCHERS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (EICONRUS), pp.1458-1462.

12. Mikheeva, TI; Mikheev, SV and Chugunov, AI, Methodology for the Formation of the Infrastructure of

Intelligent Management of Transport Processes, 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS), PROCEEDINGS OF THE 8TH SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INTELLIGENT DECISION MAKING SUPPORT (ITIDS 2020) 174 , pp.228-232.

13. Grebeshkov, AY, Optical transport network management via machine learning and ontology-based technique, 17th International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Telecommunications, OPTICAL TECHNOLOGIES FOR TELECOMMUNICATIONS 2019 11516.

14. Miskiewicz, R and Szczepanska-Woszczyna, K, Innovation Management in Polish Transport in the Industry 4.0 Perspective, 34th International-Business-Information-Management-Association (IBIMA) Conference, VISION2025: EDUCATION EXCELLENCE AND MANAGEMENT OF INNOVATIONS THROUGH SUSTAINABLE ECONOMIC COMPETITIVE ADVANTAGE , pp.9366-9376.

15. Chmielewski, J, Transport Demand Model Management System, 3rd World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS), 3RD WORLD MULTIDISCIPLINARY CIVIL ENGINEERING, ARCHITECTURE, URBAN PLANNING SYMPOSIUM (WMCAUS 2018) 471.

16. Nowicka, K, STRATEGIC ROLE OF TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE TRANSPORT MANAGEMENT, 8th Carpathian Logistics Congress on Logistics, Distribution, Transport and Management (CLC), 8TH CARPATHIAN LOGISTICS CONGRESS (CLC 2018) , pp.218-223.

17. Rymkevich, AA and Novichikhin, AV, Management of a transport and logistics terminal: models, indicators and optimization, International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND RESEARCH CONFERENCE ON KNOWLEDGE-BASED TECHNOLOGIES IN DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF MINERAL RESOURCES 377.

18. Daron, M and Gorska, M, Challenges and Problems of Transport Management in the Mining Sector, 33rd International-Business-Information-Management-Association (IBIMA) Conference, EDUCATION EXCELLENCE AND INNOVATION MANAGEMENT THROUGH VISION 2020 , pp.2357-2372

REFERENCES

1. Zhuravlev P.V. Mirovoj opyt v upravlenii personalom. Obzor zarubezhnyh istochnikov: monografiya [World experience in personnel management: Review of foreign sources]. Yekaterinburg: Business book, 2008, 232 p.

2. Ivanov, O. Sovremennyy format ocenki personala, Personal-Mix, 2009, 4: 78-81.

3. Ishchenko, S, Opredelenie strategicheskogo napravleniya v rabote s personalom na osnove naliza sluzhebnogo povedeniya, Upravlenie personalom, 2011, 11: 24-30.

4. Zhao, TR (Zhao Tianran) *Study of Human Resource Management Benefits* HUMAN RESOURCES MANAGEMENT IN THE KNOWLEDGE ECONOMY ERA, VOLS I AND II, Univ Jinan, Jinan, PEOPLES R CHINA OCT 2009 24-25: 947-952.

5. Sojka, L (Sojka, Ladislav), *Trends and Challenges in Human Resources Management in the New Millennium*, MANAGEMENT 2016: INTERNATIONAL BUSINESS AND MANAGEMENT, DOMESTIC PARTICULARITIES AND EMERGING MARKETS IN THE LIGHT OF RESEARCH, 6th International Scientific Conference on International Business and Management, Domestic Particularities and Emerging Markets in the Light of Research, SLOVAKIA, SEP 29-OCT 02, 2016, Pages 162-168.

6. Strohmeier, S (Strohmeier, Stefan), *Digital human resource management: A conceptual clarification*, GERMAN JOURNAL OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT-ZEITSCHRIFT FUR PERSONALFORSCHUNG, Volume 34, Issue 3, Pages 345-365.

7. Meirinhos, VA (Meirinhos, Viviana Andrade) Couto, AI (Couto, Ana Isabel) *Societal Human Resources Management and Development*, INNOVATION MANAGEMENT AND EDUCATION EXCELLENCE VISION 2020: FROM REGIONAL DEVELOPMENT SUSTAINABILITY TO GLOBAL ECONOMIC GROWTH, VOLS I – VI, 27th International Business Information Management Association Conference, Milan, ITALY, MAY 04-05, 2016, pp. 1584-1587.

8. Yakunina, N.V., Yakunin, N.N., Men'shih, O.M., Gribkov, K.V. Vliyanie sostoianija organizacionno-tehnologicheskoy sistemy na bezopasnost' perevozok passazhirov avtomobil'nym transportom [Vliyanie sostoyaniya organizacionno-tehnologicheskoy sistemy na bezopasnost' perevozok passazhirov avtomobil'nym transportom] *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2018, 1: 20-24.

9. Frolov, O.U., Yakunin, N.N., Yakunina, N.V., Postnikov A.A., Metodika prognozirovaniya kolichestva avtotransportnyh sredstv v regione: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Nauka Rossii: celi i zadachi, Ekaterinburg, NIC L-Zhurnal, Patr 1, 2021: 118-121.

10. Yakunin, N (Yakunin Nikolay), Yakunina, N (Yakunina Natalya), Kotov, V (Kotov Vitaliy), Kabanova, O (Kabanova Olga) Staffing analysis of the regional motor transport complex (by the case of the Orenburg region), The VII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Management of Transport Systems" (ITMTS 2021), MATEC Web Conf., 341, 2021.

11. Rogov, AA; Serebryakova, OI and Makarova, MA Quality Management of the Megacities Transport Hubs Development, Design and Construction PROCEEDINGS OF THE 2019 IEEE CONFERENCE OF RUSSIAN YOUNG RESEARCHERS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (EICONRUS), pp.1458-1462.

12. Mikheeva, TI; Mikheev, SV and Chugunov, AI, Methodology for the Formation of the Infrastructure of Intelligent Management of Transport Processes, 8th Scientific Conference on Information Technolo-

gies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS), PROCEEDINGS OF THE 8TH SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INTELLIGENT DECISION MAKING SUPPORT (ITIDS 2020) 174, pp.228-232.

13. Grebeshkov, AY, Optical transport network management via machine learning and ontology-based technique, 17th International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies for Telecommunications, OPTICAL TECHNOLOGIES FOR TELECOMMUNICATIONS 2019 11516.

14. Miskiewicz, R and Szczepanska-Woszczyna, K, Innovation Management in Polish Transport in the Industry 4.0 Perspective, 34th International-Business-Information-Management-Association (IBIMA) Conference, VISION 2025: EDUCATION EXCELLENCE AND MANAGEMENT OF INNOVATIONS THROUGH SUSTAINABLE ECONOMIC COMPETITIVE ADVANTAGE, pp.9366-9376.

15. Chmielewski, J, Transport Demand Model Management System, 3rd World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS), 3RD WORLD MULTIDISCIPLINARY CIVIL ENGINEERING, ARCHITECTURE, URBAN PLANNING SYMPOSIUM (WMCAUS 2018) 471.

16. Nowicka, K, STRATEGIC ROLE OF TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE TRANSPORT MANAGEMENT, 8th Carpathian Logistics Congress on Logistics, Distribution, Transport and Management (CLC), 8TH CARPATHIAN LOGISTICS CONGRESS (CLC 2018), pp.218-223.

17. Rymkevich, AA and Novichikhin, AV, Management of a transport and logistics terminal: models, indicators and optimization, International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND RESEARCH CONFERENCE ON KNOWLEDGE-BASED TECHNOLOGIES IN DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF MINERAL RESOURCES 377.

18. Daron, M and Gorska, M, Challenges and Problems of Transport Management in the Mining Sector, 33rd International-Business-Information-Management-Association (IBIMA) Conference, EDUCATION EXCELLENCE AND INNOVATION MANAGEMENT THROUGH VISION 2020, 2357-2372.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фролов О.Ю. Постановка задачи и формулировка основных положений укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона в кадрах с профильным образованием.

Якунина Н.В. Разработка алгоритма реализации укрупнённой методики определения потребности автотранспортного комплекса региона в трудовых ресурсах.

Якунин Н.Н. Статистическая обработка экспериментальных данных и выявление закономерностей.

Котов В.В. Анализ ранее выполненных работ по тематике исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Oleg U. Frolov. The statement of the task and formulation of the main principals of the consolidated methodology for determining the needs of the road transport complex in the region in human recourses with a specialized education.

Natalia V. Yakunina. Development of an algorithm for the implementation of the consolidated methodology for determining the human resource needs of the road transport complex in the region.

Nikolay N. Yakunin. Statistical processing of experimental data and patterns identification.

Vitaly V. Kotov. Analysis of previous work on the topic of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фролов Олег Юрьевич – соискатель кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ORCID 0000-0002-6198-2621 (460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru).

Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ORCID 0000-0002-7240-4982 (460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru).

Якунина Наталья Владимировна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ORCID 0000-0002-8895-1307 (460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru).

Котов Виталий Валерьевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ORCID 0000-0002-6176-3162 (460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, 8(987)780-48-00, v_v_kotov@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg U. Frolov, Cand. of Sci., Applicant of the Motor Transport Department, Orenburg State University, 460018, Orenburg, Pobedy ave., 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6198-2621.

Nikolay N Yakunin, Dr. of Sci., Professor, Head of the Automobile Transport Department, Orenburg State University, 460018, Orenburg, Pobedy ave., 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru, ORCID 0000-0002-7240-4982.

Natalia V. Yakunina, Dr. of Sci., Associate Professor, Professor of the Automobile Transport Department, Orenburg State University, 460018, Orenburg, Pobedy ave., 13, 8(3532)91-22-26, yakunin-n@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8895-1307.

Vitaly V. Kotov, Cand. of Sci., Senior Lecturer of the Automobile Transport Department, Orenburg State University, 460018, Orenburg, Pobedy ave., 13, 8(987)780-48-00, v_v_kotov@mail.ru, ORCID 0000-0002-6176-3162.

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ 3D АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Л.Х. Загороднюк, М.Ю. Елистраткин,
Д.С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова»
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы наблюдается активное развитие 3D аддитивных технологий. Данная тенденция не могла не затронуть строительную отрасль. Однако печать с использованием пластмасс и прочих органических соединений значительно отличается по своим технологическим особенностям от печати строительных составов. Бетоны и растворы, применяемые при послойной печати, должны обладать рядом технологических свойств, таких как достаточная вязкость для выдавливания экструдером, низкая подвижность для сохранения геометрии после укладки, высокая скорость схватывания и прочность после затвердевания. В настоящее время существует ряд составов, удовлетворяющих данным требованиям, однако они, как правило, не отличаются высокой прочностью и требуют наличия широкой сырьевой базы, которая может быть недоступна в условиях полевой печати. Как следствие, необходимо расширять спектр строительных составов для 3D-печати, подходящих под вышеназванные критерии, а также удовлетворяющих экономическим показателям.

Материалы и методы. Проведены исследования с применением физико-механических испытаний, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии по влиянию тонкомолотых минеральных добавок на микроструктуру и процессы твердения композиционных вяжущих с различными дозировками функциональных добавок.

Результаты. Представлены результаты исследований по получению композиционных вяжущих для 3D аддитивных технологий с использованием портландцемента и техногенных отходов – отходов мокрой магнитной сепарации старооскольского электрометаллургического комбината, модифицированных добавками-ускорителями (Технониколь Master) и пластификаторами (Полипласт ПК-R), с применением математического планирования и построением математических моделей для композиционных вяжущих, обладающих различными сроками твердения.

Заключение. Доказана эффективность использования полученного композиционного вяжущего, применение которого обеспечивает повышение реологических свойств, а также даёт возможность экономить дорогостоящий портландцемент.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционные вяжущие, сухие строительные смеси, 3D аддитивные технологии, строительная 3D-печать, реология, активные добавки.

Поступила 08.08. 21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Загороднюк, Л.Х. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий / Л.Х. Загороднюк, М.Ю. Елистраткин, Д.С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 428-439.

© Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури Саад Кхалил Шадид, 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>

COMPOSITE BINDERS FOR 3D ADDITIVE TECHNOLOGIES

*Lilia Kh. Zagorodnuk, Mikhail Yu. Elistratkin,
Daniil S. Podgorny, Al Mamuri Saad Khalil Shadid
V. G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia*

ABSTRACT

Introduction. In recent years, there has been an active development of 3D additive technologies. This trend could not but affect the construction industry. However, printing using plastics and other organic compounds differs significantly in its technological features from printing with building compounds. Concrete and mortars used in layer-by-layer printing must have a number of technological properties, such as sufficient viscosity for extrusion by an extruder, low mobility to maintain geometry after laying, high setting speed and strength after hardening. Currently, there are a number of compositions that meet these requirements, however, they, as a rule, are not distinguished by high strength and require a wide raw material base, which may not be available in field printing conditions. As a result, it is necessary to expand the range of building materials for 3D printing, suitable for the above criteria, as well as satisfying economic indicators.

Materials and methods. Research has been carried out using physical and mechanical tests, X-ray phase analysis and electron microscopy on the effect of finely ground mineral additives on the microstructure and hardening processes of composite binders with various dosages of functional additives.

Results. The results of studies on the production of composite binders for 3D additive technologies using Portland cement and man-made waste - waste of wet magnetic separation of the Stary Oskol electrometallurgical plant, modified with additives accelerators (Technonikol Master) and plasticizers (Polyplast PK-R) using mathematical planning and construction of mathematical models for composite binders with different hardening times are presented.

Conclusion. The efficiency of using the obtained composite binder has been proven, the use of which provides an increase in rheological properties, and also makes it possible to save expensive portland cement.

KEYWORDS: composite binders, dry building mixtures, 3D additive technologies, 3D construction printing, rheology, active additives.

Submitted 08.08.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Lilia Kh. Zagorodnuk, Mikhail Yu. Elistratkin, Daniil S. Podgorny, Al Mamuri Saad Khalil Shadid. Composite binders for 3d additive technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 428-439. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>.

© Zagorodnuk L.Kh., Elistratkin M.Yu., Podgorny D.S., Al Mamuri Saad Khalil Shadid, 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Технологии производства строительных изделий и конструкций имеют свои специфические требования, в равной степени это относится и к 3D аддитивным технологиям. Особенности этих технологий заключаются в послойном отверждении строительной смеси по 3D-модели, подготовленной методом компьютерного 3D-моделирования. Именно специфика послойной технологии требует использования в технологическом процессе сухих строительных смесей (ССС), обеспечивающих высокие показатели качества готовой конструкции.

Применение композиционных вяжущих и сухих строительных смесей в 3D-технологиях позволяет значительно повысить ряд технологических характеристик и снизить материалоемкость.

Учитывая особенности возведения зданий и сооружений по 3D-технологии, которая заключается в послойном формовании элементов сооружения и их последующем отверждении в отформованной конструкции, предъявляются особые требования к формовочным смесям по удобоукладываемости, срокам схватывания, требуемой прочности, а в зависимости от назначения объекта и другим специфическим требованиям.

При проектировании СССР для 3D-технологий исключительно важным является выбор вяжущих веществ, учитывая, что именно вяжущее в значительной мере определяет основные технологические, физико-механические и эксплуатационные свойства формовочных

смесей и затвердевших бетонных конструкций.

Как правило, в 3D аддитивных технологиях используют портландцемент или гипс, однако эффективным альтернативным решением по применяемому вяжущему являются композиционные вяжущие, которые позволяют значительно экономить дорогостоящий и энергоёмкий цемент или гипс^{1,2,3}.

Уникальные свойства композиционных вяжущих обусловлены рациональным подбором составов вяжущего компонента и минеральных наполнителей. Важно отметить необходимость ориентации на новую сырьевую базу из горных пород с высокой внутренней энергией^{4,5}.

Применение химических добавок позволяет проводить «тонкую настройку» разрабатываемого композиционного вяжущего. Именно эти добавки дают возможность получения в больших объёмах композиционных вяжущих и сухих строительных смесей на их основе для применения в строительной 3D-печати [1, 2]. Применение добавок-ускорителей и пластификаторов позволяет снизить расход цемента до 15% и более [5].

Основной критерий оценки эффективности добавок-ускорителей – это ускорение процесса твердения на 25% и прочности бетона на 20% на первые сутки при стандартных условиях [6].

Важной особенностью формовочных растворов для 3D аддитивных технологий является их способность сохранять свои реологические свойства в течение 20–40 мин с применением капсульной системы загрузки

¹ Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Глаголев Е.С., Елистраткин М.Ю., Лашина И.В., Масанин О.О. Объективные предпосылки перехода к композиционным вяжущим // В сборнике: Наукоемкие технологии и инновации. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 2016. С. 110–116.

² Дребезгова М.Ю., Евсюкова А.С., Чернышева Н.В., Потапов В.В. К вопросу управления процессами структурообразования композиционных гипсовых вяжущих // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, чл.-кор. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 263–268.

³ Минаков С.В., Елистраткин М.Ю. К вопросу выбора компонентов композиционных вяжущих // В сборнике: Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»), г. Грозный. 2015. С. 365–370.

⁴ Сулейманова Л.А., Лесовик В.С., Глаголев Е.С. Высокая реакционная активность наноразмерной фазы кремнезема композиционного вяжущего // В сборнике: Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова. 2015. С. 87–93.

⁵ Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Володченко А.А., Глаголев Е.С., Дребезгова М.Ю. Композиционные материалы с использованием энергосберегающего техногенного сырья для 3D аддитивных технологий // В сборнике: НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ. Сборник докладов международной научно-практической конференции. 2016. С. 452–456.

строительного принтера. Изменение реологии смеси до момента её формования создаст значительные затруднения для дальнейшей подачи её в формирующую головку из смесителя-бетононасоса по трубопроводу [3, 4].

Следует правильно совмещать различные добавки, так как на практике они могут быть несовместимыми, что приведет к коагуляции и полной нейтрализации действия как пластифицирующего, так и ускоряющего компонента. Совместимость добавок с цементами вызваны их минеральным составом, видом и типом заполнителя, роли контактной зоны на границе заполнитель – цементный камень – добавки. До сих пор не предложено общих единых подходов к оценке совместимости компонентов формовочных бетонных смесей для 3D аддитивных технологий [7, 8].

При проектировании бетонных составов для 3D аддитивных технологий часто поднимают вопрос полноценного армирования конструкций, а также заводского производства армирующих элементов для 3D-печати. Стоит отметить, что классическое армирование каркасами и сетками создаст значительные трудности для автоматизации процесса укладки смеси, что наводит на мысль применения дисперсной арматуры (фибробетон) и неметаллических тканых сеток (текстиль-бетон) [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Наряду с созданием композиционных вяжущих для этих технологий необходимо изучить и разработать составы с дисперсным армированием.

Получение высоких прочностных показателей конструкций на основе данной технологии не является первостепенной задачей, а значит, ключевыми моментами при проектировании сухих строительных смесей для 3D аддитивных технологий стоит считать регулирование реологических свойств смеси и сроков её схватывания [16, 17, 18, 19].

Проблема создания композиционных вяжущих с эффективными функциональными добавками и их оптимальными дозировками, а также регулирование физико-механических, технологических и реологических свойств является актуальной задачей в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использованы следующие сырьевые компоненты: портландцемент марки 500 без минеральных добавок (ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2016) производства ЗАО «Осколцемент», в качестве минеральной добавки применялись отходы мокрой магнитной сепарации (ММС), для достижения требуемых реологических свойств были использованы пластифицирующая добавка Полипласт ПК-R и ускоритель твердения Технониколь Master.

Для приготовления композиционных вяжущих различных составов производился совместный помол сырьевых компонентов в лабораторной вибрационной мельнице MB-20. Изучена микроструктура гидратированных образцов на электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA3 LMU. Определение фазового состава полученных композиционных вяжущих производилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Реологические свойства определялись методом миниконуса (основания миниконуса 20 и 40 мм). Физико-механические свойства определяли в соответствии с требованиями ГОСТ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При математическом планировании эксперимента определён оптимальный диапазон дозирования компонентов: отходов ММС от 0 до 50% (X_2), Полипласт ПК-R использовался в дозировке 0,4%, Технониколь Master в дозировках от 0 до 6% (X_1), на основании принятых дозировок была составлена матрица планирования экспериментов, в которой учитывалось два переменных фактора: количество отходов ММС (0,25 и 50% от массы цемента, коэффициенты $X_2=1, 0, -1$ соответственно) и ускорителя твердения (0,3 и 6% от массы цемента, коэффициенты $X_1=-1, 0, 1$ соответственно). Результаты физико-механических испытаний образцов представлены в таблице и на рисунке 1.

Таблица
Матрица планирования эксперимента

Table
Experiment Plannig matrix

Точка плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействия факторов	Расплав мини-конуса, мм, через мин			Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут					
						0	10	20	2 _{ср}	2 _{макс}	7 _{ср}	7 _{макс}	28 _{ср}	28 _{макс}
	x ₁	x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₁ x ₂									
1	1	1	1	1	1	40	40	40	5,9	7,6	52,1	53,8	74,43	76,86
2	1	-1	1	1	-1	145	40	40	1,4	1,5	19,3	19,6	27,57	28,00
3	-1	1	1	1	-1	140	140	140	22,9	26,2	47,9	47,9	68,43	68,43
4	-1	-1	1	1	1	150	180	200	14,7	14,8	23,3	23,5	33,29	33,57
5	1	0	1	0	0	55	40	40	2,7	2,7	36,7	42,3	52,43	60,43
6	-1	0	1	0	0	140	135	130	24,6	25,5	35	38,4	50,00	54,86
7	0	1	0	1	0	130	40	40	19,0	23,8	36,4	51,2	52,00	64,00
8	0	-1	0	1	0	150	135	120	5,0	5,4	21,8	22,4	31,14	32,00
9	0	0	0	0	0	40	40	40	6,2	7	35,7	38,6	51,00	55,14

МПа

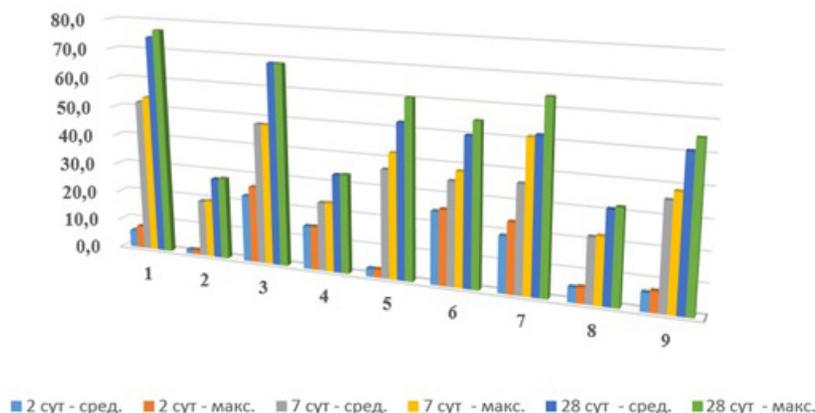


Рисунок 1 – Изменение прочности образцов композиционных вяжущих различных составов в зависимости от сроков твердения

Figure 1 – Change in strength of composite binder samples of different compositions as a function of curing time

На основании полученных результатов была проведена статистическая обработка данных в Microsoft Excel и составлены математические модели, позволяющие получать составы с заданными прочностными показателями в исследуемом диапазоне дозирования отходов ММС и добавки-ускорителя. Уравнения регрессии прочности композиционных вяжущих на сжатие:

$$R^2_{\text{план}2} = 9,86 - 8,7x_1 + 4,45x_2 + 1,967x_1^2 + 0,317x_2^2 - 0,925x_1 \cdot x_2;$$

$$R^7_{\text{план}2} = 32,86 - 0,317x_1 + 12x_2 + 4,417x_1^2 - 2,33x_2^2 + 2,05x_1 \cdot x_2;$$

$$R^{28}_{\text{план}2} = 46,937 + 0,452x_1 + 17,143x_2 + 6,31x_1^2 - 3,33x_2^2 + 2,929x_1 \cdot x_2.$$

На основании данных уравнений были составлены номограммы (рисунок 2), визуально отображающие зависимость прочности от принятых переменных параметров.

Исследованы фазовый состав и микроструктура образцов композиционных вяжущих с оптимальными технологическими и прочностными свойствами.

Анализ дифрактограмм (рисунок 3) проводился для образцов с наилучшими показателями прочности и требуемым расплавом миниконуса – 40 мм через 20 мин после затвердения (составы 1,3,5,9).

Бездобавочный (контрольный) состав №3 готовился с использованием товарного порт-

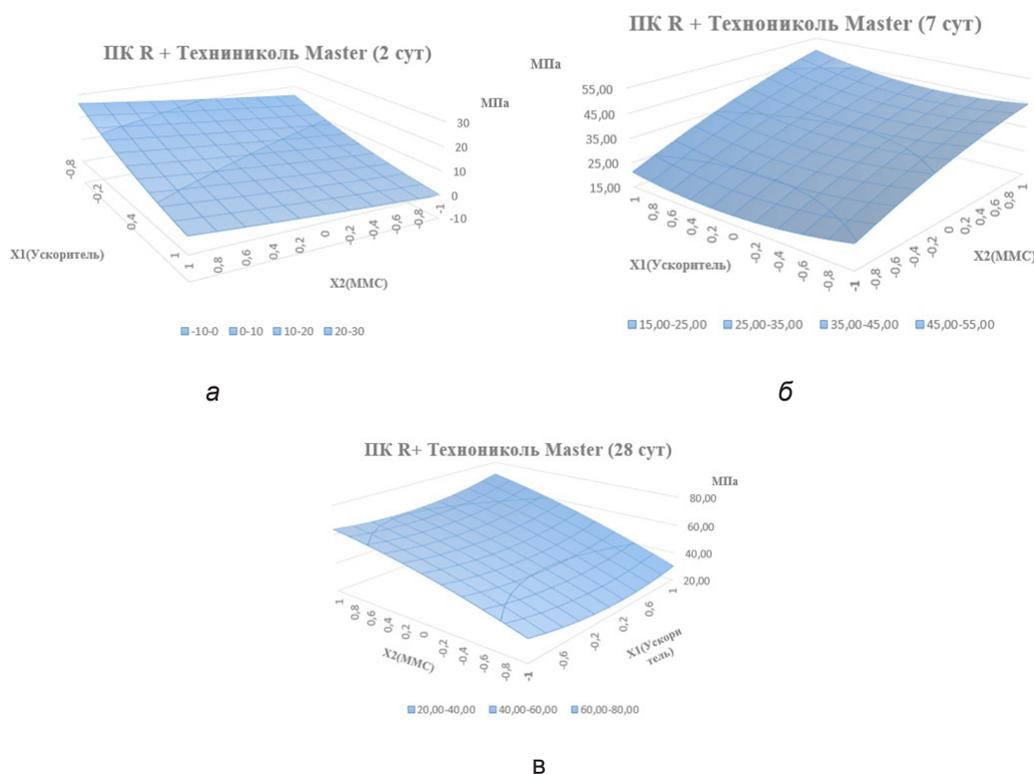


Рисунок 2 – Номограммы прочности композиционных вяжущих различных составов в возрасте: а – 2 сут; б – 7 сут; в – 28 сут

Figure 2 – Nomograms of the strength of composite binders of different compositions at the age of: a - 2 days; б - 7 days; в - 28 days

ландцемента без минеральной добавки и ускорителя. Прочность данного состава составила 68,43 МПа, однако расплыв конуса не соответствовал предъявляемым требованиям и составил 140 мм через 20 мин после затворения. На дифрактограммах отчётливо видно высокое содержание гидросиликатов кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и незначительное количество портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что свидетельствует о классическом протекании гидратационных процессов.

Состав композиционного вяжущего №1 на основе товарного цемента и добавки-ускорителя Техниколь Master в количестве 6% показал: прочность 74,43 МПа (на 8% выше контрольного), что обусловлено введением добавки-ускорителя и активизацией гидратации на ранних стадиях твердения. Данный состав удовлетворил поставленным технологическим требованиям по реологии (расплыв миниконуса составил 40 мм через 20 мин). Анализ дифрактограмм данного состава показал увеличение дифракционных максимумов, гидросиликатам кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97;$

$2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и снижением дифракционных максимумов, присущих портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что обусловлено более активными процессами гидратации на ранних стадиях.

Композиционные вяжущие составов №5 и 9, приготовленные с применением товарного портландцемента в количестве 75% и отходов ММС в количестве 25%, а также с использованием добавки-ускорителя в диапазоне от 3 до 6% показали, что прочности данных вяжущих близки и составляют 52,43 МПа и 51,00. Технологические требования этих составов по реологии удовлетворяли требованиям и составляли 40 мм спустя 20 мин после затворения. Анализ дифрактограмм показывает высокое содержание гидросиликатов кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и незначительное содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что свидетельствует о более полном протекании гидратационных процессов. При этом отмечается присутствие кремнеземистых компонентов SiO_2 ($d=4,25; 2,45; 2,28; 1,817; 1,54 \text{ \AA}$), вносимых отходами мокрой магнитной сепарации.

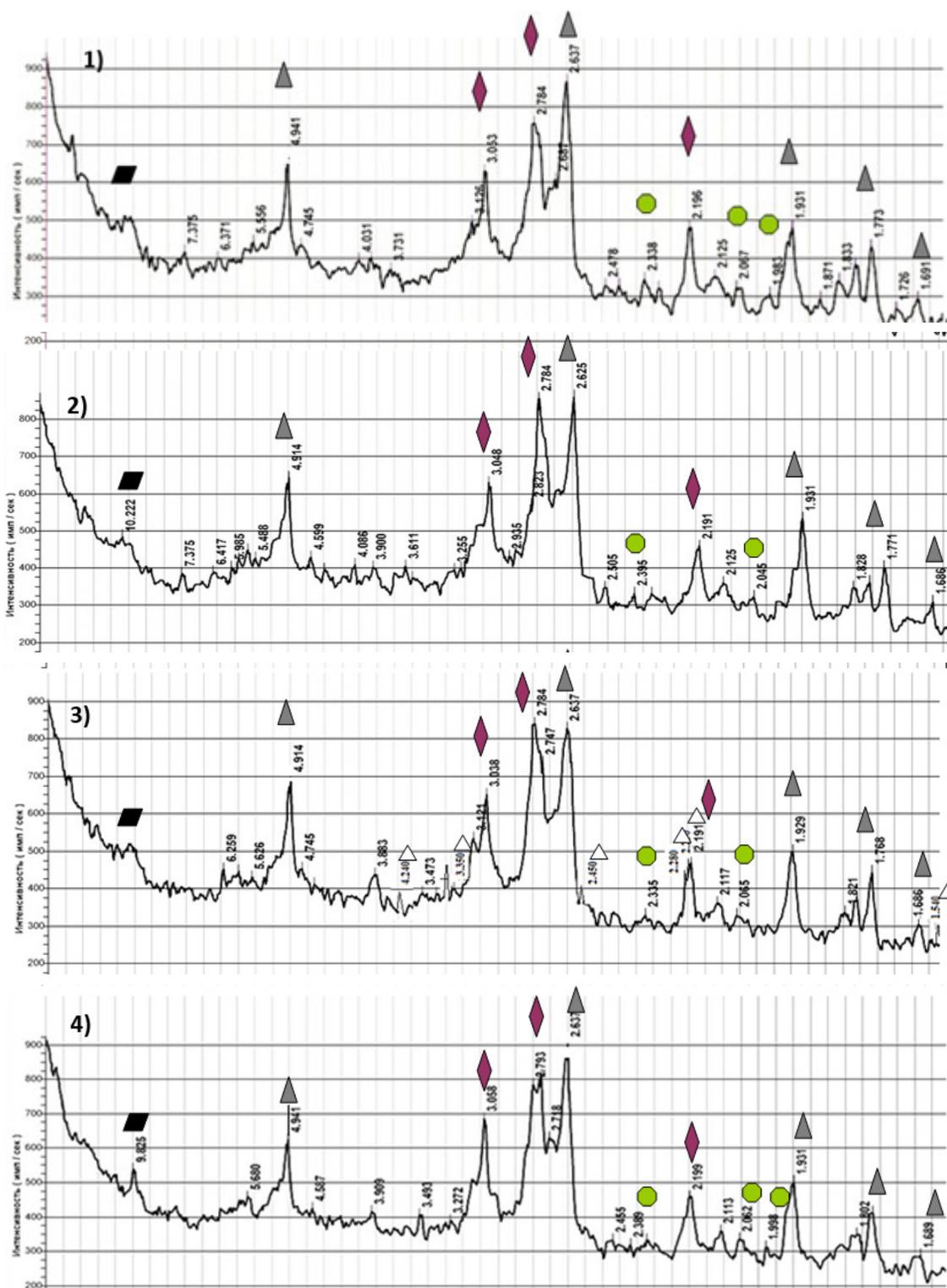


Рисунок 3 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм: 1 – портландцемент 100%+6% Технониколь Master; 2 – портландцемент 100%; 3 – портландцемент 75%+25% MMC%+6% Технониколь Master; 4 – портландцемент 75%+25% MMC%+3% Технониколь Master

Figure 3 – Fragments of X-ray diffractograms: 1 – Portland cement 100%+6% Technonikol Master; 2 – Portland cement 100%; 3 – Portland cement 75%+25% MMC%+6% Technonikol Master; 4 – Portland cement 75%+25% MMC%+3% Technonikol Master

Анализ микроструктур цементных камней, приготовленных на товарном портландцементе (100%) и с использованием добавки-ускорителя Технониколь Master показывает, что структура в возрасте 28 сут характеризуется как равномерно-зернистая и плотная, отмечается незначительное количество пор по всему объёму. Микроструктура цементного камня с добавкой-ускорителем характеризуется более равномерно-зернистой структурой по всему объёму образца, что обуславливается действием добавок-ускорителей, которые активизируют процессы гидратации цементных систем и приводят к интенсификации образования гелей, которые в свою очередь захватывают значительное количество жидкой фазы. В результате этих процессов происходит ускорение схватывания и более интенсивное упрочнение цементного камня.

На микрофотографиях видно, что с ускорением процессов гидратации происходило ускорение образования трёхмерных зародышей новой фазы и увеличение дисперсности продуктов гидратации (рисунок 4).

Анализ микроструктур (рисунок 5) композиционного вяжущего составов: портландцемент – 75%, отходы ММС – 25% и различным содержанием добавки-ускорителя Технониколь Master – 3–6% показывает, что структура изломов образцов равномерно-зернистая и визуально схожа со структурой чистого цементного камня, наблюдается наличие незначительного

количества пор от 0,03 мм до 0,5 мм. При увеличении до 100 мкм видны включения зёрен минерального наполнителя – отходов мокрой магнитной сепарации, которые равномерно распределены в общем объёме материала и плотно обросли цементными новообразованиями. При дальнейшем увеличении до 10 мкм наблюдается картина, подобная бездобавочному цементному камню: структура обусловлена наличием отдельных блоков-агрегатов, образованных параллельно ориентированными слоями чешуйчатых поликристаллов, ориентация слоёв ограничена размерами одного блока. При детальном рассмотрении наблюдается параллельная слоистость на отдельных участках микрофотографий. Особенностью композитного состава с применением минерального наполнителя является то, что частицы ММС, присутствуя в цементной матрице, уплотняют структуру и одновременно служат демпферами для снижения внутренних напряжений. Все частицы дисперсного минерального наполнителя покрыты субмикроструктурной оболочкой в виде бахромы. Появление такой структуры говорит о возможности протекания гидратации на поверхности частиц минеральной добавки с образованием субмикроструктурных гидратных фаз, уплотняющих структуру полученного камня за счёт создания дополнительных связей между отдельными зёрнами композита.

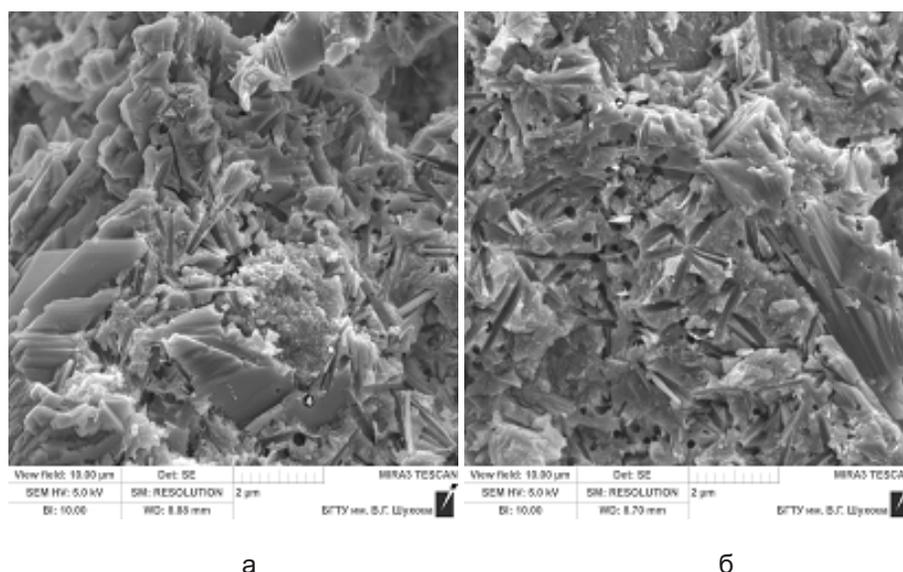


Рисунок 4 – Микроструктура: а – контрольного состава №3; б – композиционного состава №1, портландцемент – 100%, Технониколь Master – 6%

Figure 4 – Microstructure: a – control composition No. 3; b – composite composition No. 1, Portland cement – 100%, Technonikol Master – 6%

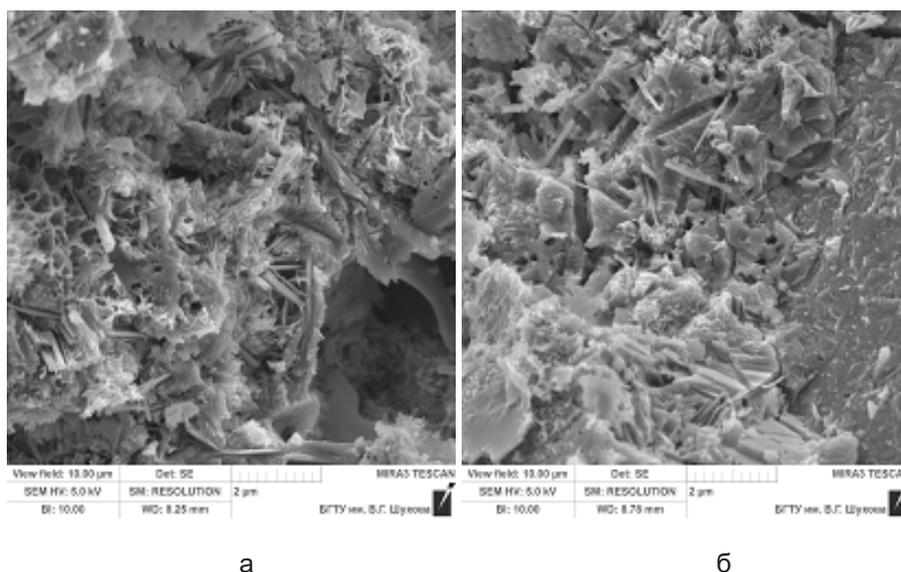


Рисунок 5 – Микроструктура: а – композиционного состава №5, портландцемент – 75%, отходы MMC – 25%, Технониколь Master – 6%; б – композиционного состава №5, портландцемент – 75%, отходы MMC – 25%, Технониколь Master – 3%

Figure 5 – Microstructure: a – composition No. 5, Portland cement – 75%, MMC waste – 25%, Technonikol Master – 6%; b – composition No. 5, Portland cement – 75%, MMC waste – 25%, Technonikol Master – 3%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рациональный подбор комбинации активного компонента и минеральных добавок является главным критерием, формирующим свойства композиционных вяжущих. За счёт химических модификаторов – пластификаторов и ускорителей твердения – реализуется «тонкая настройка» системы, что обуславливает выполнение требуемых технологических и физико-механических показателей в новой инновационной технологии строительства.

Проведена статистическая обработка экспериментальных данных, в результате чего были получены математические модели изменения прочностных показателей от составов композиционных вяжущих, обеспечивающих требуемые свойства растворным смесям для 3D аддитивной технологии. Полученные номограммы позволят оптимизировать технологический процесс приготовления и укладки формовочных смесей в возводимый строительный объект.

Наличие минерального наполнителя в гидратированных растворах в виде отходов MMC способствует заполнению внутренних пор и дефектов, что обеспечивает формирование плотной структуры цементного камня. Использование отходов MMC в качестве наполнителя в сухих строительных смесях позволяет экономить дорогостоящий энергоёмкий портланд-

цемент, снижая экономические затраты, одновременно повышая физико-механические показатели вяжущего и долговечность за счёт уплотнения структуры материала.

Исследования микроструктур сколов цементных камней полученных композиционных вяжущих показали, что все частицы дисперсного минерального наполнителя покрыты субмикроструктурной структурой в виде бахромы. Такие структуры говорят о возможности протекания процессов гидратации на поверхности зерен минерального наполнителя с образованием дополнительных субмикроструктурных гидратных фаз, которые уплотняют структуру цементного камня и дополнительно связывают отдельные зерна композита, что адекватно согласуется с достаточно высокими показателями цементного камня по прочности при сжатии.

Разработаны рациональные составы сухих строительных смесей на предложенных композиционных вяжущих для использования в 3D-технологиях. Показано, что составы сухих строительных смесей для использования 3D-технологий удовлетворяют технологическим и эксплуатационным требованиям, что позволяет рекомендовать их применять для апробирования в промышленных условиях согласно технологическому регламенту и проекту сооружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24113.

The work is realized in the framework of the RFBR according to the research project № 18-29-24113.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапелин А.Н., Елистраткин М.Ю. Лёгкие бетоны нового поколения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 79–83.

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials 260 (2020) 120440

3. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Куприна А.А., Елистраткин М.Ю., Володченко А.Н. Эффективные кладочные растворы для автоклавных стеновых материалов // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 22–25.

4. Zagorodnyuk L.K., Sumskey D.A. Study of the hydration processes of modified binders by infrared spectroscopy // Materials Science Forum. 2019. T. 974. С. 49–54.

5. EgorSecieru, Shirin Fataei, Christof Schröfl, Viktor Mechtcherine. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology // Construction and Building Materials. Volume 144, 30 July 2017, Pages 451–461

6. Рахимбаев Ш.М., Шахова Л.Д., Твердохлебов Д.В. Реологические свойства пеноцементных систем с добавкой анионного пенообразователя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2003. № 4. С. 6.

7. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. 10. С. 6–14

8. Чернышева Н.В., Агеева М.С., Эльян Исса Жамал Исса, Дребезгова М.Ю. Влияние минеральных добавок различного генезиса на микроструктуру гипсоцементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 12–18.

9. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 9–16.

10. Nadv R., Peled A., Mechtcherine V., Hempel S., Nicke D., Schroefl C. (2018) Improved Bonding of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites by Mineral Particle Coating. In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) Strain-Hardening Cement-Based Composites. SHCC 2017. RILEM Bookseries, vol 15. Springer, Dordrecht

11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction

material // Materials Letters. Volume 209, 15 December 2017, Pages 146–149

12. Christ S. et al. Fiber reinforcement during 3D printing // Materials Letters. – 2015. – Т. 139. – С. 165–168.

13. Лесовик В.С., Попов Д.Ю., Глаголев Е.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 81–84.

14. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. № 3–4 (68–69). С. 39–42.

15. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan & Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and construction industry: a review // Virtual and Physical Prototyping. Volume 12, 2017 - Issue 3. Pages 261–276

16. Nerella V. N. et al. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D) // Rheologische Messungen an Baustoffen 2016: Tagungsband zum 25. Workshop und Kolloquium, 2. und 3. März an der OTH Regensburg. – tredition, 2016.

17. Савицкий Н.В., Шатов С.В., Ожищенко О.А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (216). С. 18–26.

18. Compton B. G., Lewis J. A. 3D printing of lightweight cellular composites // Advanced materials. – 2014. – Т. 26. – №. 34. – С. 5930–5935.

19. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Абсиметов М.В., Шаталова С.В., Лесниченко Е.Н. Адаптация технологии неавтоклавного газобетона к строительной 3D-печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 6–11.

REFERENCES

1. Sapelin A.N., Elistratkin M.YU. Lyogkie betony novogo pokoleniya [Lightweight concretes of the new generation] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2014. 4: 79–83. (In Russian)

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials 260 (2020) 120440

3. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Kuprina A.A., Elistratkin M.YU., Volodchenko A.N. effektivnye kladochnye rastvory dlya avtoklavnyh stenovykh materialov [Effective masonry solutions for autoclave wall materials] // Stroitel'nye materialy. 2016. 12: 22–25. (In Russian)

4. Zagorodnyuk L.K., Sumskey D.A. Study of the hydration processes of modified binders by infrared spectroscopy // Materials Science Forum. 2019. T. 974. S. 49–54.

5. EgorSecieru, Shirin Fataei, Christof Schröfl, Viktor Mechtcherine. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology // Construction and Building Materials. Volume 144, 30 July 2017, Pages 451–461

6. Rahimbaev SH.M., SHahova L.D., Tverdohlebov D.V. Rheologicheskie svoystva penocementnyh sistem s dobavkoj anionnogo penobrazovatelya [Rheological properties of foam cement systems with the addition of anionic foaming agent] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2003. 4: 6.

7. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., SHatalova S.V., Starikov M.S. Formirovanie svoystv kompozitsij dlya stroitel'noj pechati [Formation of properties of compositions for construction printing] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2017. 10: 6-14 (In Russian)

8. CHernysheva N.V., Ageeva M.S., El'yan Issa ZHamal Issa, Drebezgova M.YU. Vliyanie mineral'nyh dobavok razlichnogo genezisa na mikrostrukturu gipsocementnogo kamnya [The effect of mineral additives of various genesis on the microstructure of gypsum cement stone] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2013. 4: 12-18. (In Russian)

9. Lesovik V.S. Stroitel'nye materialy. Nastoyashchee i budushchee [Construction materials. Present and future] // *Vestnik MGSU*. 2017. 12. 1(100): 9-16. (In Russian)

10. Nativ R., Peled A., Mechtcherine V., Hempel S., Nicke D., Schroefl C. (2018) Improved Bonding of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites by Mineral Particle Coating. In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) *Strain-Hardening Cement-Based Composites*. SHCC 2017. RILEM Bookseries, vol 15. Springer, Dordrecht

11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material // *Materials Letters*. Volume 209, 15 December 2017, Pages 146-149

12. Christ S. et al. Fiber reinforcement during 3D printing // *Materials Letters*. – 2015. – T. 139. – S. 165-168.

13. Lesovik V.S., Popov D.YU., Glagolev E.S. Tekstil'-beton - effektivnyj armirovannyj kompozit budushchego [Textile-concrete is an effective reinforced composite of the future] // *Stroitel'nye materialy*. 2017. 3: 81-84. (In Russian)

14. Bazhenov YU.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novye betony [Ways of development of construction materials science: new concretes] // *Tekhnologii betonov*. 2012. 3-4 (68-69): 39-42. (In Russian)

15. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan&Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and construction industry: a review // *Virtual and Physical Prototyping*. Volume 12, 2017 - Issue 3. Pages 261-276

16. Nerella V. N. et al. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D) // *Rheologische Messungen an Baustoffen 2016: Tagungsband zum 25. Workshop und Kolloquium, 2. und 3. März an der OTH Regensburg*. – tradition, 2016.

17. Savickij N.V., SHatov S.V., Ozhishchenko O.A. 3D-pechat' stroitel'nyh ob'ektov [3D-printing of construction objects] // *Vestnik Pridneprovskoj gosudarstvennoj akademii stroitel'stva i arhitektury*, 2016, 3 (216): 18-26

18. Compton B. G., Lewis J. A. 3D printing of lightweight cellular composites // *Advanced materials*. – 2014. – T. 26. – № 34. – S. 5930-5935.

19. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., Absimetov M.V., SHatalova S.V., Lesnichenko E.N. Adaptatsiya tekhnologii neavtoklavnogo gazobetona k stroitel'noj 3d pechati [Adaptation of non-autoclaved aerated concrete technology to construction 3D printing] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2017. 8: 6-11 (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Загороднюк Л.Х. Формулировка направления и темы исследования, подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Контроль и консультирование по вопросам проведения эксперимента и написанию статьи.

Елистраткин М.Ю. Составление плана проведения эксперимента, консультирование по вопросам строительной 3D-печати, применению активных химических и минеральных добавок.

Подгорный Д.С. Проведение эксперимента, написание, редактирование и оформление статьи.

Ал Мамури Саад Халил Шадид. Проведение эксперимента.

COAUTHORS CONTRIBUTION

Lilia Kh. Zagrodnuk - Formulation of the direction and topic of the research, selection of the theoretical basis for the experiment. Supervising and advising on the conduct of the experiment and the writing of the paper.

Mikhail Yu. Elistratkin - Drawing up a plan for the experiment, advising on construction 3D printing, the use of active chemical and mineral additives.

Daniil S. Podgorniy - Carrying out the experiment, writing, editing and layout of the article.

Al Mamuri Saad Khalil Shadid - Conducting an experiment.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Загороднюк Лилия Хасановна – д-р техн. наук, проф., ORCID: 0000-0001-9840-4414, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, +7(980)524-47-12, lh47@mail.ru).

Елистраткин Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц., ORCID: 0000-0002-3303-224X, доц. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, mr.elistratkin@yandex.ru).

Подгорный Даниил Сергеевич – студент кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций, ORCID: 0000-0001-7435-5005 ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, dan_podgor@mail.ru).

Ал Мамури Саад Кхалил Шадид – аспирант кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, saad.shadeed.ss71@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lilia Kh. Zagorodnuk – Dr. of Sci., Professor, ORCID: 0000-0001-9840-4414, Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technologi-

cal University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, 7(980)524-47-12, lhz47@mail.ru).

Mikhail Yu. Elistratkin - Cand. of Sci., Associate Professor, ORCID: 0000-0002-3303-224X, Associate Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, r.elistratkin@yandex.ru).

Daniil S. Podgornyi, Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, dan_podgor@mail.ru).

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Postgraduate Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, saad.shadeed.ss71@gmail.com).

ВІМ І VR: РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Т.А. Козленко, С.В. Придвижкин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Основываясь на тенденциях, можно проследить нарастающий интерес к технологии VR в строительстве. Эта относительно новая технология быстро заменяет традиционные способы визуализации, предоставляя пользователям расширенные возможности работы с цифровыми технологиями. Целью работы является анализ применения технологии виртуальной реальности в строительстве, на основе анализа определить, каким образом можно улучшить интеграцию и найти новые идеи для применения технологий.

Материалы и методы. В результате анализа предыдущих исследований было выявлено отсутствие методов осуществления передачи данных из системы VR в программное обеспечение BIM. В связи с выявленной проблемой целью данной научной работы является улучшение интеграции технологий VR и BIM путем осуществления автоматической передачи данных из программы виртуальной реальности в исходную информационную модель.

Результаты. В ходе работы был создан проект на базе информационной модели, выполненной в программном комплексе Autodesk Revit и импортированной в игровой движок Unreal Engine 4 для создания интерактивной виртуальной среды. Рассмотрен новый подход к созданию и презентации эскиза проекта с помощью технологии виртуальной реальности – метод интуитивного проектирования в виртуальной среде.

Обсуждение и заключение. Программный модуль находится на этапе ранней разработки, тем не менее имеет перспективы для развития в полноценное приложение, доступное для любых пользователей. В работе приведены основные направления для продолжения разработки приложения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, виртуальная реальность, BIM, VR.

Поступила 25.06.21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Козленко, Т.А. BIM и VR: разработка программного модуля для интеграции информационного моделирования зданий и виртуальной реальности / Т.А. Козленко, С.В. Придвижкин. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-440-449> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 440-449.

© Козленко Т.А., Придвижкин С.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-440-449>

BIM AND VR: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODULE FOR THE INTEGRATION OF BUILDING INFORMATION MODELLING AND VIRTUAL REALITY

Tatiana A. Kozlenko, Stanislav V. Pridvizhkin

*First President of Russia B.N. Yeltsin Ural Federal University,
Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Based on the trends, the growing interest in VR technology in construction can be traced. This relatively new technology is rapidly replacing traditional visualization methods, providing users with an enhanced digital experience. The aim of the work is to analyze the application of virtual reality technology in construction, based on the analysis, determine how to improve integration and find new ideas for the application of technologies.

Methods and materials. As a result of the analysis of previous studies, it was revealed that there are no methods for transferring data from the VR system to the BIM software. In connection with the identified problem, the goal of this scientific work is to improve the integration of VR and BIM technologies by automatically transferring data from a virtual reality program to the original information model.

Results. In the course of the work, a project was created based on a BIM model made in the Autodesk Revit software package and imported into the Unreal Engine 4 game engine to create an interactive virtual environment. A new approach to the creation and presentation of a project sketch using virtual reality technology is considered - a method of intuitive design in a virtual environment.

Discussion and conclusion. The software module is at the stage of early development; nevertheless, it has prospects for development into a full-fledged application available to any user. The paper provides the main directions for the continuation of the application development.

KEYWORDS: information modelling, BIM, virtual reality, VR.

Submitted 25.06.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Kozlenko T.A., Pridvizhkin S.V. Bim and vr: development of a software module for the integration of building information modelling and virtual reality. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 440-449. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-440-449>.

© Kozlenko T.A., Pridvizhkin S.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Строительство – это процесс, который использует новейшие знания и технологии времени. Однако идти в ногу с достижениями современности непросто для ветеранов отрасли. Строительная индустрия является наиболее консервативной и инерционной в отношении цифровизации. Изменения в традиционных и устоявшихся методах строительного процесса зачастую приводят к многочисленным трудностям [1]. В наше время до сих пор широко применяется метод проектирования зданий, который возник ещё в 16 в. Это проектирование с помощью плоских проекций: фасадов, разрезов, планов, видов и пр. Чтобы правильно понять замысел архитектора и проектировщика, необходимо умение мысленно строить трехмерный объём по плоским чертежам. Такое умение вырабатывается у специалистов с годами учебы и практики [2].

Для демонстрации идеи будущего здания заказчику без специального образования требуется трехмерная визуализация проекта. Одним из способов воспроизвести объём будущего здания является макетирование. Уменьшенные копии проектируемых зданий производят большое впечатление на публику, макеты понятны и эффектны. Однако первичное утверждение проекта на основании макета не всегда приводит к успешной приемке выполненного строительного объекта. Человек может проанализировать пространство и понять замысел архитектора лишь при непосредственном нахождении в пространстве в реальном масштабе и реальном времени [3].

Новые технологии открывают новые возможности. Не так давно стало широко распространяться информационное моделирование зданий и сооружений Building Information Modeling (BIM) [4]. BIM является одной из важнейших технологий в строительной индустрии, которая улучшает качество проектирования и проектов в целом [5].

Намного позже в информационное моделирование стала интегрироваться технология виртуальной реальности Virtual Reality (VR). В 1999 г. Фред Брукс определил VR как «полное погружение в интерактивный виртуальный мир» [6]. Это подразумевает, что пользователь имеет контроль над точкой обзора, которая является основой любой VR-системы. Виртуальная реальность берет свое начало в индустрии развлечений, однако получила значительное развитие в проектировании, машиностроении и образовании [7]. Основываясь на тенденци-

ях, можно проследить нарастающий интерес к технологии VR и в строительстве [8, 9]. Эта относительно новая технология быстро заменяет традиционные способы визуализации, предоставляя пользователям расширенные возможности работы с цифровыми технологиями [10].

VR делает устаревшей практику макетирования. Вместо того чтобы тратить силы, время и деньги на создание множества отдельных, часто одноразовых макетов, заинтересованные стороны могут посетить сеанс виртуальной реальности, чтобы легко рассмотреть проект в реальном масштабе и перемещаться по сложным частям моделируемого здания [11].

Виртуальная экскурсия выполняется на основе информационной модели, которая используется на всех этапах строительства. При наличии интерактивных систем пользователи могут наблюдать в VR, как изменения повлияют на среду проекта. Видение будущего еще до того, как оно произойдет, может предотвратить коллизии, задержки в графике строительных работ и сократить расходы, что позволит проектировщикам и архитекторам сосредоточиться на проекте, а не на макетах с кратковременной полезностью [12].

Цель научной работы – объединить метод BIM и технологию визуализации VR путём передачи данных между системами.

В соответствии с заданной целью поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие способы интеграции технологий BIM и VR.
2. Разработать программный модуль для передачи данных между системами.
3. Рассмотреть практическое применение интеграции BIM и VR.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По результатам анализа существующих способов интеграции технологий был рассмотрен ряд исследовательских работ. В научной работе Фридера Кирна анализируются возможности применения VR в BIM, а также редактирование моделей IFC в VR [13]. В этой статье автор описывает способ импорта информационной модели в формате IFC в игровой движок Unity с помощью библиотеки xBIM, разработанной на C #, передачу изменений из Unity обратно в файл IFC. В этом способе возникает сложность при импорте файла в игровой движок, но нет зависимости от конкретного программного обеспечения для BIM-проектирования.

В 2017 г. опубликована исследовательская работа, описывающая систему, которая использует интерактивную и иммерсивную среду виртуальной реальности для имитации дневного и искусственного освещения в зданиях [14]. Кроме того, система дает возможность пользователям взаимодействовать с объектами дизайна, изменять их и сравнивать несколько вариантов проектирования, а также выгружает данные по качеству освещения и потребления энергии в реальном времени. Для реализации процесса использован Autodesk Revit в качестве программного обеспечения BIM. Программное обеспечение BIM экспортирует свойства модели в FBX-файле. Затем файл загружается в программное обеспечение Autodesk 3ds Max в качестве подготовки к игровому движку Unreal Engine. После завершения необходимых приготовлений измененный файл FBX импортируется в Unreal Engine. Проблема в этом сценарии заключается в том, что обмен информацией происходит только во время экспорта информационной модели в игровой движок и нет эффективного способа отправить информацию обратно в программу BIM.

Другое интересное исследование было сделано Томасом Хилфертом и Маркусом Кенигом в 2016 г. [15]. В отличие от других подходов они использовали в качестве источника данных не программное обеспечение для BIM-проектирования, а сервер BIM OpenSource. Связав сервер с игровым движком Unreal Engine через программный интерфейс приложения, пользователи могут загружать свои файлы IFC на сервер, а затем преобразовывать их в VR. Благодаря такому подходу приложение VR не зависит от программного обеспечения BIM-разработчика. Редактирование модели в VR невозможно, но файлы IFC могут обновляться на сервере и затем повторно импортироваться в игровой движок.

В статье А.В. Чистяков описывает программный модуль виртуального прототипирования архитектурной среды [16]. Программа для интерактивного композиционного моделирования позволяет проектировать и исследовать объемно-пространственные архитектурные композиции в реальном времени при помощи системы виртуальной реальности. В программе есть возможность выбора и редактирования расположения трехмерных элементов и источников освещения. Это позволяет проводить изучение основных видов и закономерностей гармонизации трехмерной архитектурной объемно-пространственной композиции.

Преыдушие исследования показали многие методы интеграции виртуальной реальности с BIM для разных целей, например дизайна внутреннего освещения [17], проектирования с учетом доступа в здание для маломобильных групп населения [18]. Однако всех их объединяет отсутствие методов для полной интеграции этих систем. В частности, нет метода осуществления передачи данных из системы VR в программное обеспечение BIM.

В связи с выявленной проблемой предыдущих исследований целью данной научной работы является улучшение интеграции технологий VR и BIM путем осуществления автоматической передачи данных из программы виртуальной реальности в исходную информационную модель.

В качестве программного обеспечения для информационного моделирования в строительстве будет использоваться Autodesk Revit – программный комплекс для автоматизированного проектирования, реализующий принцип информационного моделирования зданий. Предназначен для архитекторов, конструкторов и инженеров-проектировщиков.

Revit является одной из самых распространенных программ в строительной отрасли, в связи с этим имеет множество дополнительных плагинов для совместной работы со вспомогательными программными средами, в том числе с программами для создания виртуальной среды.

Кроме того, программа предоставляется бесплатно для студентов на весь период обучения, что стало одним из критериев выбора ПО для научной работы.

Для создания и отображения виртуальной реальности необходимо специальное программное обеспечение. В целом разработка приложений виртуальной реальности во многом схожа с разработкой видеоигр, поскольку они представляют собой интерактивную среду [19]. Подходящим программным обеспечением для создания 3D-миров в VR являются так называемые игровые движки (game engine). Игровые движки – это комплекс прикладных программ, которые составляют основу для разработки игр, обеспечивают графическую визуализацию, звуковое сопровождение, перемещение внутриигровых персонажей, соблюдение физических эффектов и законов и многое другое.

В зависимости от технических требований будущей игры существуют разные игровые движки: Unity, Unreal Engine, CryEngine, Amazon Lumberyard и др. У каждого игрового

движка есть свои сильные и слабые стороны в отношении языка программирования, физики, функциональной совместимости [20].

Для создания программного модуля будет исписываться один из самых популярных Unreal Engine 4 (UE). Его разработка началась в 1998 г., и с тех пор он постоянно модернизируется, дополняется и совершенствуется. Движок является кроссплатформенным, проекты, созданные с его помощью, могут быть импортированы на все актуальные игровые платформы. Также UE имеет большое сообщество разработчиков с множеством уроков и магазин ассетов, ускоряющих разработку проекта.

UE имеет встроенную систему визуального программирования Blueprints, которая существенно понижает порог входа в процесс разработки. Основой написания кода для работы в движке является C++, который отлично реализуется с помощью Blueprints.

Для тестирования программного модуля будет использовано оборудование для виртуальной реальности Oculus Quest 2. Данная модель является автономной, для работы в программе Unreal Engine необходимо беспроводное подключение к компьютеру. Гарнитура с шестью степенями свободы отслеживает движения головы и тела и в точности воспроизводит их в VR. Внешние датчики не требуются.

Чтобы обеспечить качественный опыт виртуальной реальности, компьютер, к которому подключается VR-гарнитура, должен отвечать минимальным техническим требованиям, установленным производителем гарнитуры. В зависимости от гарнитуры VR-требования к компьютеру могут отличаться.

Основные требования относятся к центральному процессору (CPU) и видеокarte. Для оборудования Oculus Quest 2 необходим центральный процессор Intel i5-4590 / AMD Ryzen 5 1500X, видеокarta NVIDIA GeForce GTX 970 / AMD Radeon 400 Series, также другие аппаратные компоненты ПК, такие как оперативная память (для Oculus Quest 2 не менее 8 Гбайт), оперативная система (Windows 10) и тип хранилища (SSD).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы был создан проект на базе информационной модели, выполненной в программном комплексе Autodesk Revit и импортированной в игровой движок Unreal Engine 4 для создания интерактивной виртуальной среды.

В Revit исходная информационная модель создается и конвертируется в формат для за-

грузки в игровой движок UE. В UE на основе импортируемой информационной модели создается VR-проект, позволяющий пользователю в виртуальной реальности изменять положение объектов в модели. После завершения сеанса виртуальной реальности запускается плагин, который считывает изменение координат в модели и формирует файл с данными. В Duplicato запускается скрипт, который считывает файл с данными и применяет изменение положения к объектам в исходной информационной модели. На рисунке 1 приведена общая схема процесса.

Основные этапы процесса:

1. *Создание информационной модели.* Исходная информационная модель представляет собой комнату с предварительно размещенной мебелью. Модель разрабатывается в программном комплексе Autodesk Revit в формате .rvt. После завершения построения модели её необходимо экспортировать в игровой движок UE4 для формирования виртуальной среды. Программа UE4 не поддерживает формат .rvt, поэтому модель из Revit необходимо экспортировать в формат .udatasmith.

2. *Экспорт модели.* Для этой задачи существует специальный плагин Datasmith, который устанавливается в Revit и дает возможность экспортировать модель. С помощью этого инструмента формируется новый файл, Datasmith File, отдельный от информационной модели. Формат содержит не только 3D-геометрию, но и параметры объектов, представляющие интерес на дальнейших этапах процесса передачи данных.

Время формирования файла зависит от размера и степени проработки информационной модели. Для тестирования программного модуля использовалась модель комнаты с небольшим количеством мебели. Общий размер файла .rvt составлял 27 Мбайт, экспорт в формат .udatasmith занял около 4 сек. Размер сформированного файла .udatasmith вместе с библиотекой текстур составлял 13,4 Мбайт.

Во время работы с более масштабными моделями время экспорта будет увеличиваться, однако перед экспортом есть возможность выбора элементов, которые необходимо выгрузить для дальнейшей работы. Настройка производится в программе Revit путем скрытия на 3D-виде элементов, которые не должны быть экспортированы. Таким образом, в файл udatasmith будет выгружено только то, что представляет интерес и отображается на 3D-виде, а не полностью вся модель.

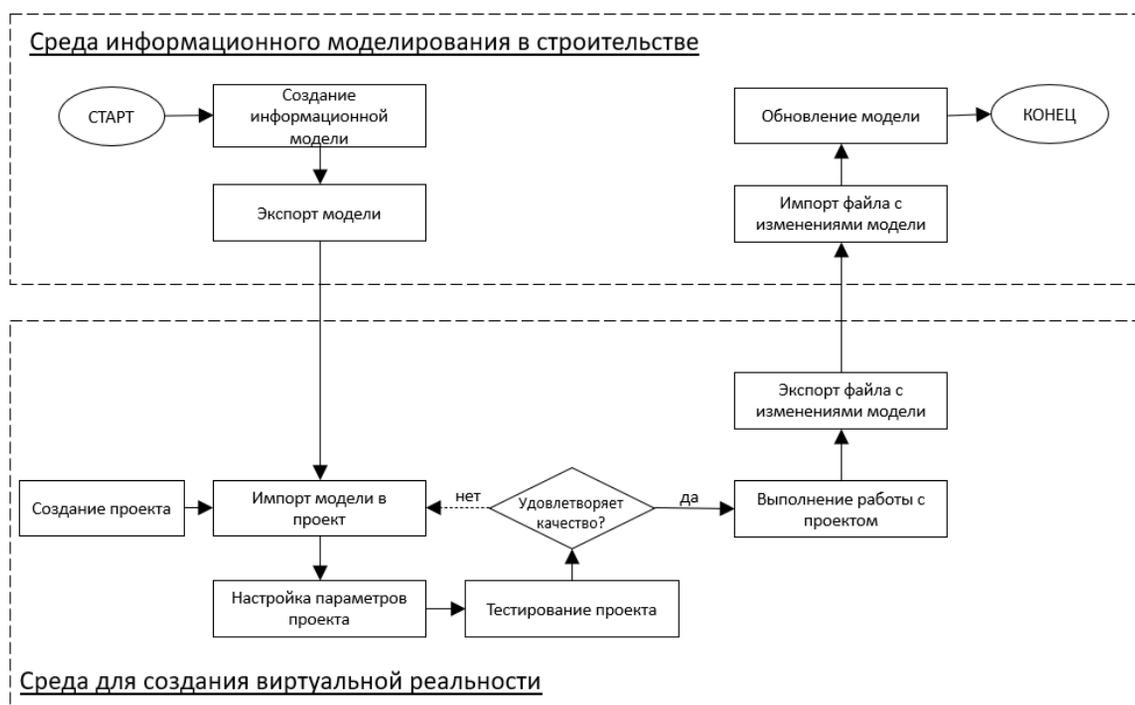


Рисунок 1 – Общая схема процесса передачи данных

Figure 1 – General diagram of the data transfer process

3. *Создание проекта для виртуальной реальности.* Проект создается в программе Unreal Engine 4 на основе стандартного шаблона.

4. *Импорт модели в проект.* Импорт модели формата .udatasmith в пустой проект осуществляется автоматически с помощью плагина Datasmith, установленного в игровом движке. Импорт файла размером 13,4 Мбайт занял около 10 сек.

5. *Настройка параметров проекта.* Подготовка проекта для работы виртуальной реальности заключается в настройке параметров источников света и материалов объектов, создании инструментов для перемещения пользователя в модели и возможности перемещения объектов. Для этого составляются программные модули в среде для визуального программирования Blueprint.

6. *Тестирование проекта.* Перед началом работ в модели необходимо протестировать сделанные ранее настройки параметров проекта.

7. *Выполнение работы с проектом.* Работа с проектом выполняется в программе Unreal Engine в специальном режиме сеанса виртуальной реальности. Пользователь с помощью гарнитуры VR передвигается по модели в реальном масштабе и перемещает объекты в модели, создавая в результате собственный проект.

8. *Экспорт файла с изменениями модели.* Для сохранения данных об изменении местоположения объектов модели используется плагин, разработанный в среде Blueprint (рисунок 2). При завершении сеанса виртуальной реальности в программе Unreal Engine плагин автоматически создает на компьютере файл с данными в формате текстового документа .txt. Файл содержит объекты JSON, представленные как пары: ключ / значение. Ключ – это ID (идентификатор) перемещенного объекта модели, присвоенный в Revit. Значение – это список, предоставляющий собой значения координат. Создание файла занимает доли секунды.

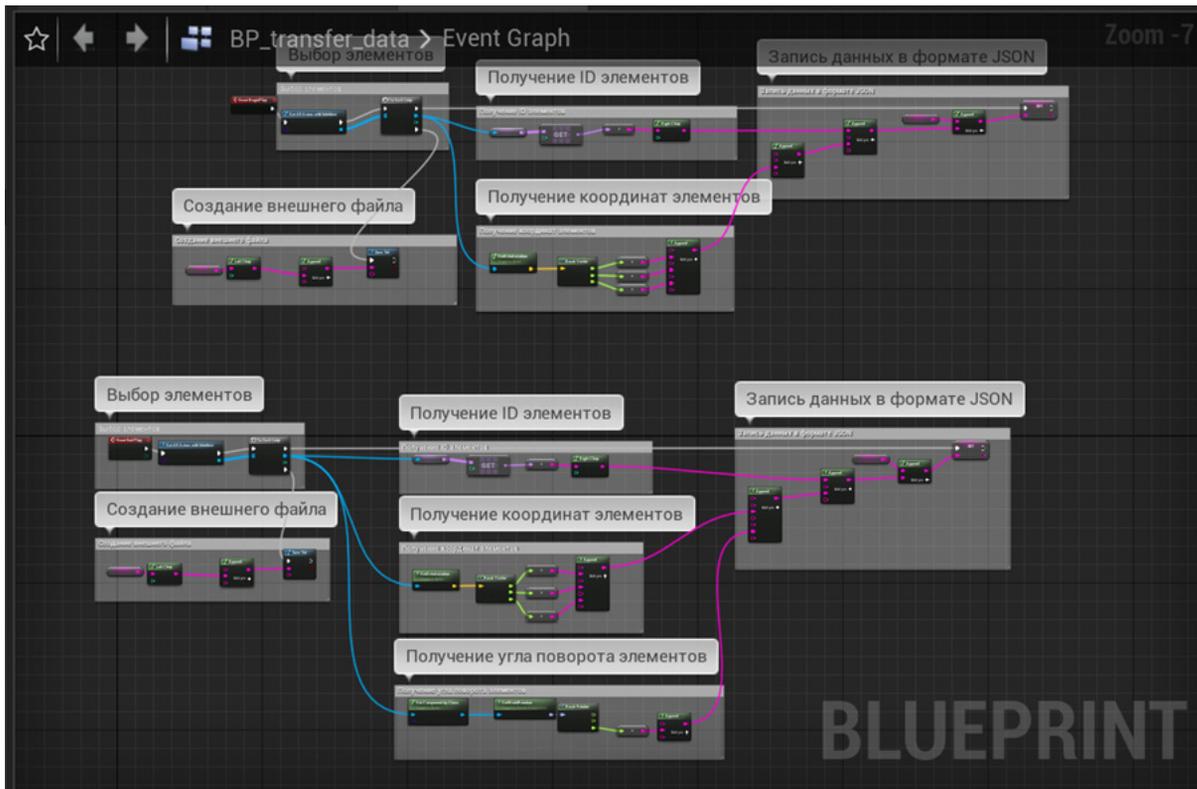


Рисунок 2 – Плагин в среде BluePrint

Figure 2 – Blueprint plugin

9. *Импорт файла с изменениями модели.* Импорт данных в исходную информационную модель осуществляется с помощью программного модуля в среде Dynato (рисунок

3). Скрипт загружает файл с новыми координатами объектов, сравнивает с исходными координатами и вычисляет разницу.

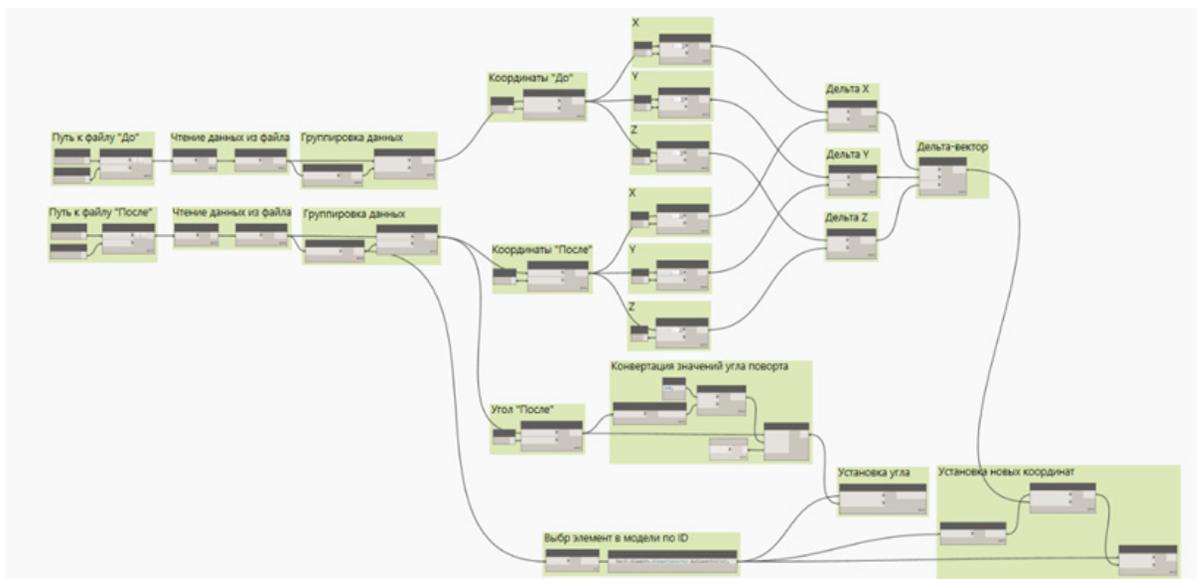


Рисунок 3 – Скрипт в среде Dynato

Figure 3 – Dynamo script

10. *Обновление модели.* Обновление информационной модели выполняется автоматически с помощью скрипта в среде Дупато. Объекты модели перемещаются на вычисленную разницу координат. В тестовой модели размером 27 Мбайт время на обновление координат объектов составило менее 1 сек.

Описанный программный модуль находится на ранней стадии разработки. Однако, судя по исследованию, можно сделать вывод, что его использование для реализации интуитивного проектирования возможно. Программный модуль позволяет погружаться в виртуальный мир, чтобы эффективнее создавать эскиз будущего проекта. Кроме того, реализована автоматическая передача данных из игрового движка в программу для информационного моделирования.

Использование игрового движка, такого как Unreal Engine, предоставляет большое количество возможностей для доработки и улучшения программного модуля.

В качестве перспективы развития научной работы намечены следующие идеи:

1. Создать приложение на основе программного модуля для работы с моделью без запуска игрового движка.

2. Реализовать простой и понятный пользовательский интерфейс.

4. Изучить, как виртуальная реальность может быть интегрирована с другим программным обеспечением BIM.

Одним из аспектов применения технологии виртуальной реальности в строительстве является возможность интуитивного проектирования.

Эффект присутствия внутри виртуального пространства будущего здания облегчает задачу по созданию эскиза интерьера. В виртуальной реальности можно не только осматривать модель, но и оперировать с ее объектами. Это дает возможность расставить мебель и оборудование, находясь в модели помещения в реальном масштабе и исходя из удобства пользования будущим пространством. Более того, с задачей создания предварительного эскиза помещения в виртуальном пространстве может справиться любой пользователь без специальной подготовки основываясь только на своих ощущениях. В этом заключается идея интуитивного проектирования с помощью виртуальной реальности.

Результатом интуитивного проектирования является эскиз будущего проекта, созданный при непосредственном участии заказчика, что снижает вероятность неприятия окончательного результата [5].

Созданный эскиз передается специалистам для его доработки до проектной и рабочей документации в программах для информационного моделирования.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа теоретической основы и существующего практического применения интеграции VR и BIM было определено, что технологии хорошо дополняют друг друга. Виртуальная реальность может применяться для различных целей в строительной отрасли, но существуют проблемы в передаче данных между системами, что не позволяет в полной мере интегрировать VR в метод BIM.

В ходе работы сформулирована идея нового применения VR в строительстве – интуитивное проектирование в виртуальной среде. Эффект реального масштаба в виртуальном пространстве проектируемого объекта значительно облегчает задачу создания эскиза интерьера жилого помещения. Интуитивное проектирование может освоить любой пользователь без специальной подготовки основываясь только на своих ощущениях и расставляя объекты интерьера в виртуальной среде по своему удобству.

Таким образом, VR в строительстве можно использовать не только для визуализации объектов, но и как дополнительный инструмент для проектирования.

С целью сохранения принципа информационного моделирования об актуальности и автоматизации внесения изменений был разработан программный модуль для автоматической передачи данных из программы Unreal Engine 4 в исходную информационную модель в программе Autodesk Revit. Так реализована полноценная интеграция технологии виртуальной реальности в метод информационного моделирования.

Программный модуль находится на этапе ранней разработки, тем не менее имеет перспективы для развития в полноценное приложение, доступное для любых пользователей. В работе приведены основные направления для продолжения разработки приложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисова Л.А., Абидов М.Х. Проблемы цифровизации строительной отрасли // УЭПС. 2019. №3. С. 53–58.

2. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информацию моделирования зданий [Текст] / Талапов В.В. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 392 с.: ил.

3. Серебренникова Т.А., Раевский А.А. Феномен информационного пространства в архитектуре в эпоху процессов глобализации // Вестник ТГАСУ. 2017. №1 (60).

4. Eastman C., Teicholz P. Sacks R., Lee G. BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2018. 506 p.

5. Марк Фармер. Модель организации труда в строительной отрасли Великобритании: обзор Фармера [Текст] / Марк Фармер. – Construction Leadership Council, CLC, 2016. – 76 с.

6. Brooks F.P. What's Real About Virtual Reality? University of North Carolina at Chapel Hill. 1999, pp. 16-27.

7. Figueres-Munoz A., Merschbrock C. Overcoming challenges in BIM and gaming integration: The case of a hospital project. WIT Transactions on The Built Environment. 2015, pp. 329-340.

8. Цифровизация строительной отрасли // Strategy Partners. – 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ict-online.ru/news/n168088/>.

9. Дегай Е. Исследование: Применение технологий дополненной и виртуальной реальности [AR|VR] на промышленных предприятиях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://4industry.ru/ar-vr-research> (дата обращения: 13.12.19).

10. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин И.А. «Безбумажная» архитектура в контексте виртуальной реальности // Architecture and Modern Information Technologies. – 2012. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marhi.ru/AMIT/2012/special_12/saprykina/abstract.php (дата обращения: 05.05.2021).

11. Вигер И.Н. Роль и значение технологий VR в BIM-подходе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.remmag.ru/journal/?journal=68> (дата обращения: 06.12.19).

12. Юхвид А.В. Компьютерные виртуальные технологии в современной науке // Научно-исследовательские исследования. 2014. С. 155–177.

13. Kirn F. Building Information Modeling and Virtual Reality: Editing of IFC Elements in Virtual Reality. [Online]. URL: https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018_Kirn_Braun.pdf (reference date: 01.05.2021)

14. Natephra, W., Motamedi, A., Fukuda, T., Yabuki, N. Integrating building information modeling and virtual reality development engines for building indoor lighting design. Visualization in Engineering. 2017, no 5(19), pp. 84-91.

15. Hilfert, T., König, M. Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. Visualization in Engineering. 2016.

16. Чистяков А.В. Программный модуль виртуального прототипирования архитектурной среды // Architecture and Modern Information Technologies. 2019. №3(48). С. 225–235.

17. Wisén A. Integrating IFC Models and Virtual Reality for Indoor Lighting Design. [Online]. URL: <http://kth.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1335535&dswid=8621> (reference date: 03.04.2021).

18. Wu W. Design for aging with BIM and game engine integration design for aging with building information modeling and game. [Online] URL: https://www.researchgate.net/publication/283126859_Design_for_aging_with_bim_and_game_engine_integration (reference date: 03.04.2021).

19. Bille R., Smith S., Maund K., Brewer G. Extending building information models into game engines. Association for Computing Machinery. 2014, pp. 1-8.

20. Усков М.А. Обзор преимуществ и недостатков игровых движков. Обоснование выбора инструментов и технологий разработки клиентской части игровых приложений // Глобус: технические науки. 2020. №5 (36). С. 6–10.

REFERENCES

1. Borisova L. A., Abidov M. H. *Problemy cifrovizacii stroitel'noj otrasli* [Problems of digitalization of the construction industry]. *UJePS: upravlenie, jekonomika, politika, sociologija*. 2019, 3: 53-58. doi:10.24411/2412-2025-2019-00041

2. Talapov V.V. *Osnovy BIM: vvedenie v informacii modelirovaniya zdaniy* [BIM Fundamentals: An Introduction to Building Modeling Information] 2011. *DMK Press*. 392 p.

3. Serebrennikova T.A., Raevskij A.A. *Fenomen informacionnogo prostranstva v arhitekture v jepohu processov globalizacii* [The phenomenon of information space in architecture in the era of globalization processes] *Vestnik TGASU*. 2017, 1 (60): 71-81.

4. Eastman C., Teicholz P. Sacks R., Lee G. BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2018. 506 p.

5. Farmer M. *Model' organizacii truda v stroitel'noj otrasli Velikobritanii: obzor Farmera* [The UK Construction Workforce: A Farmer Review] Construction Leadership Council. 2016. 76 p.

6. Brooks F.P. What's Real About Virtual Reality? University of North Carolina at Chapel Hill. 1999, 16-27.

7. Figueres-Munoz A., Merschbrock C. Overcoming challenges in BIM and gaming integration: The case of a hospital project. WIT Transactions on The Built Environment. 2015: 329-340.

8. Strategy Partners. *Cifrovizacija stroitel'noj otrasli* [Digitalization of the construction industry] [Online]. URL: <https://ict-online.ru/news/n168088/> (reference date: 06.12.19)

9. Degaj E. *Primenenie tehnologij dopolnenoj i virtual'noj real'nosti na promyshlennyh predpriyatijah* [Application of augmented and virtual reality technologies in industrial enterprises] [Online]. URL: <http://4industry.ru/ar-vr-research> (reference date: 13.12.19).

10. Saprykina N., Saprykin I. *"Paperless" architecture in the context of virtual reality*. [Online]. URL: https://marhi.ru/AMIT/2012/special_12/saprykina/abstract.php (reference date: 05.05.2021)

11. Viger I.N. *Rol' i znachenie tehnologij VR v BIM-podhode* [The role and significance of VR Technologies in the BIM Approach] [Online]. URL: <http://www.remmag.ru/journal/?journal=68> (reference date: 06.12.19).

12. Yukhvid A.V. *Komp'yuternye virtual'nye tehnologii v sovremennoj nauke* [Computer virtual technologies in modern science] *Naukovedcheskie issledovaniya*. 2014, 155-177.

13. Kirn F. Building Information Modeling and Virtual Reality: Editing of IFC Elements in Virtual Reality. [Online]. URL: https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018_Kirn_Braun.pdf (reference date: 01.05.2021)

14. Natephra, W., Motamedi, A., Fukuda, T., Yabuki, N. Integrating building information modeling and virtual reality development engines for building indoor lighting design. *Visualization in Engineering*. 2017, 5(19): 84-91.

15. Hilfert, T., König, M. Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. *Visualization in Engineering*. 2016.

16. Chistjakov A. V. Programmnyj modul' virtual'nogo prototipirovaniya arhitekturnoj sredy [Software module for virtual prototyping of the architectural environment] *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. 3(48): 225-235.

17. Wisén A. Integrating IFC Models and Virtual Reality for Indoor Lighting Design. [Online]. URL: <http://kth.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1335535&dsid=8621> (reference date: 03.04.2021).

18. Wu W. Design for aging with BIM and game engine integration design for aging with building information modeling and game. [Online] URL: https://www.researchgate.net/publication/283126859_Design_for_aging_with_bim_and_game_engine_integration (reference date: 03.04.2021).

19. Bille R., Smith S., Maund K., Brewer G. Extending building information models into game engines. *Association for Computing Machinery*. 2014, pp. 1-8.

20. Uskov M. A. *Obzor preimushhestv i nedostatkov igrovyh dvizhkov. obosnovanie vybora instrumentov i tehnologij razrabotki klientskoj chasti igrovyh prilozhenij* [An overview of the advantages and disadvantages of game engines. substantiation of the choice of tools and technologies for the development of the client side of game applications] *Globus: tehnicheckie nauki*. 2020, 5 (36): 6-10.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Козленко Т.А. Автор статьи.

Придвижкин С.В. Формулировка направления исследования, постановка цели и задачи исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tatiana A. Kozlenko. The author of the article.

Stanislav V. Pridvizhkin. Formulation of the direction of research, setting the goals and objectives of research.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козленко Татьяна Андреевна – магистрант ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», ORCID 0000-0002-0089-0942 (620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19) , e-mail: tatiana_kozlenko@mail.ru

Придвижкин Станислав Викторович – канд. физ.-мат. наук, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» ORCID 0000-0003-4350-7779 (620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19) , e-mail: dep_bim_urfu@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana A. Kozlenko, Undergraduate student, First President of Russia B. N. Yeltsin Ural Federal University ORCID 0000-0002-0089-0942, +79126291060, e-mail: tatiana_kozlenko@mail.ru

Stanislav V. Pridvizhkin, Cand. of Sci., Dr. of Sci., Professor, Head of the Department, First President of Russia B. N. Yeltsin Ural Federal University, ORCID 0000-0003-4350-7779, e-mail: dep_bim_urfu@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Борьба с подтоплением остаётся актуальной проблемой. Применение аналогии фильтрации воды и электрического тока имеет цель защиты от подтопления окружающей среды, территорий застройки и автомобильных дорог в городах. Записывая закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигаем лучшего соответствия их аналогии. Это, в свою очередь, даёт возможность развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, например электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Такие технологии позволяют осушать глинистые грунты.

Методы и материалы. Рассмотрены совместно закон Дарси, закон Ома и закон электроосмотической фильтрации. Дана методология моделирования строительного водопонижения с учётом суммарного эффекта двух физических законов фильтрации воды и электроосмоса, оптимально сочетая высотное геометрическое расположение базисов дренирования и контактных электродов. Представлены варианты осушения глинистого грунта при действии электрического поля. При совместном использовании в осушаемом грунте сил гравитации и электрических сил постоянного тока суммарная скорость фильтрации складывается из составляющей по закону Дарси и другой составляющей скорости движения воды – электроосмотической фильтрации. Дополнительной особенностью совместного моделирования в пористой среде фильтрации воды и электроосмоса является то, что массив водоупорной части грунта и его части, относящейся к диэлектрику, могут не совпадать. Такая сложность модели преодолевается её разбиением на модули, которые затем можно объединить с соблюдением балансового принципа, сшивая модули по границам. Для продолжения научной дискуссии приведен краткий, но информативный обзор международных публикаций по рассматриваемой теме.

Обсуждение. Методология комплексного расчёта и моделирования совместных процессов фильтрации воды в грунтах, протекания электрического тока и электроосмотической фильтрации может найти полезное применение при разработке эффективной защиты от подтопления в городском строительстве. Рекомендована последовательность алгоритмических шагов моделирования. Первоначально рекомендуется проводить грубое моделирование в электронных таблицах на персональных компьютерах и мобильных телефонах. Далее следует применить другой подход моделирования. Базируясь на первоначальных грубых моделях предыдущего шага, надо записать алгоритмы на языке программирования. Скомпилированная модель исследуемых процессов фильтрации и электроосмоса позволит существенно повысить надёжность проектирования защиты от подтопления.

Заключение. Приведено сравнение совместного применения средств строительного водопонижения разной физической сущности при одновременных процессах гравитационной фильтрации подземной воды и пропускании постоянного электрического тока через осушаемый грунт, что вызывает дополнительный эффект электроосмоса. Предложено по-новому применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения более эффективных результатов инженерной деятельности путем моделирования защиты от подтопления территорий застройки, обеспечивая безопасность городского строительства при повышении уровня подземных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подтопление, подземные воды, теория фильтрации воды, электроосмос, городское строительство.

Поступила 28.04.21, принята к публикации 31.08.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Сологаев В.И., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Сологаев, В.И. Применение аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве / В.И. Сологаев. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 450-462.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>

USE OF FILTRATION AND ELECTRICITY ANALOGY IN SIMULATION OF UNDERFLOODING PROTECTION IN URBAN CONSTRUCTION

Valery I. Sologaev

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

ABSTRACT

Introduction. The fight against underflooding remains an urgent problem. The application of the analogy between water filtration and electric current has the goal of protecting the environment, built-up areas and, in particular, highways in cities from underflooding. Writing Ohm's law similarly to Darcy's filtration law, we achieve a better match to their analogy. This, in turn, makes it possible to develop new technologies for protection against underflooding in urban construction, for example, electroosmotic dewatering and its modeling. Such technologies make it possible to drain clayey soils.

Methods and materials. Darcy's law, Ohm's law and the law of electroosmotic filtration are considered together. A methodology for modelling construction dewatering is given, taking into account the combined effect of the two physical laws of water filtration and electroosmosis, optimally combining the high-altitude geometric arrangement of drainage bases and contact electrodes. The options for draining clay soil under the action of an electric field are presented. With the combined use of gravitational forces and electric direct current forces in the drained soil, the total filtration rate is the sum of the Darcy's law component and another component of the water velocity – electroosmotic filtration. An additional feature of joint modelling in a porous medium of water filtration and electroosmosis is that the mass of the water-resistant part of the soil and its part related to the dielectric may not coincide. This complexity of the model is overcome by dividing it into modules, which can then be combined in compliance with the balance principle, stitching modules along the boundaries. To continue the scientific discussion, a short but informative overview of international publications on the topic under consideration is given.

Discussion. The methodology for complex calculation and modelling of the joint processes of water filtration in soils, the flow of electric current and electroosmotic filtration can find useful application in the development of effective protection against underflooding in urban construction. A sequence of algorithmic modelling steps is recommended. Initially, it is recommended to run rough spreadsheet simulations on personal computers and mobile phones. Next, a different modelling approach should be applied. Based on the initial rough models of the previous step, it is necessary to write the algorithms in the programming language. The compiled model of the investigated filtration and electroosmosis processes will significantly increase the reliability of the design of protection against underflooding.

Conclusion. A comparison is made of the joint use of construction dewatering means of different physical essence, with simultaneous processes of gravitational filtration of underground water and passing a direct electric current through the drained soil, which causes an additional effect of electroosmosis. It is proposed to apply in a new way the analogy of water filtration and electric current in order to achieve more effective results of engineering activities by modeling protection against underflooding of building areas, ensuring the safety of urban construction when the level of groundwater rises.

KEYWORDS: Underflooding, groundwater, the theory of water filtration, electromos, urban construction.

Submitted 28.04.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation Sologaev V.I. Use of filtration and electricity analogy in simulation of underflooding protection in urban construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 450-462. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-450-462>.

© Sologaev V.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Борьба с подтоплением остаётся актуальной проблемой, требующей решения. Надо более широко применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения эффективных результатов инженерной деятельности по защите окружающей среды, территорий застройки и, в частности, автомобильных дорог в городах, при повышении уровня подземных вод, то есть при подтоплении. Традиционное определение закона электрического тока, закона Ома, для этих целей не очень удобно. Записывая закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигаем лучшего соответствия их аналогии. Это, в свою очередь, даёт возможность развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, например, электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Такие технологии позволяют осушать глинистые грунты, что обычно не эффективно стандартными методами с использованием гравитационного водоотлива и дренажа в городском строительстве и хозяйстве. Пробелом в научном знании по рассматриваемой теме являются детали моделирования, с которыми может столкнуться исследователь. Это и определило актуальность и новизну предпринятых научных изысканий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Прежде всего необходимо описать рабочие гипотезы, феноменологию и термины по заявленной теме работы. При этом заострим внимание на наиболее точных для нас определениях в рамках данного исследования.

Закон Дарси ламинарного течения (фильтрации) воды в пористой среде является линейной феноменологической зависимостью скорости фильтрации воды V_ϕ от коэффициента фильтрации k_ϕ , разности напоров ΔH , обратно пропорциональной длине пути фильтрации L . Фильтрационный расход воды Q через поперечное сечение пористого грунта или материала с площадью живого сечения w по закону Дарси имеет вид

$$Q = w \cdot V_\phi = w \cdot k_\phi \cdot \frac{\Delta H}{L}. \quad (1)$$

Область применения закона Дарси охватывает подавляющее большинство случаев практического использования систем строительного водопонижения и дренажа. Это весьма убедительно было доказано в нашей стране В.М. Павилонским [1, 2, 3] и за рубежом

Х.В. Олсенем [4]. Отклонения от закона Дарси могут быть при весьма малых градиентах напора, а также при больших его значениях. При этом важно знать, что гипотеза о прекращении фильтрационного движения воды при малых градиентах напора до сих пор остаётся дискуссионной. Особенно при защите от загрязнения подземных вод в ходе распространения опасных загрязняющих веществ в водоносном пласте. В таком случае эта гипотеза о начальном градиенте напора не может быть принята на практике вследствие отсутствия запаса надёжности и повышенного риска загрязнения подземных вод как источника водоснабжения. Первоначально эту гипотезу предложил наш соотечественник академик Н.Н. Павловский в своей монографии 1922 года [5], а С.А. Роза экспериментально пытался её подтвердить в 1950 г., однако в конце концов признал, что хотя скорость фильтрации весьма мала, но не нулевая. Аномалию закона Дарси при малых градиентах напора отмечал и Я. Бэр из технологического института Израиля в монографии [6].

По закону Ома сила электрического тока I (которую в иностранных источниках чаще всего называют «интенсивность тока», особенно во Франции: *intensité du courant*) в привычно традиционной записи линейно зависит от разности электрических потенциалов ΔU и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению R . Этот закон, особенно в школьных курсах, обычно записывают в виде

$$I = \frac{\Delta U}{R}. \quad (2)$$

Для представления более точной аналогии двух вышеупомянутых законов, определение закона Ома лучше дать для интенсивности тока I . Это будет аналогично фильтрационному расходу воды по закону Дарси. Закон Ома в этом виде является линейной феноменологической зависимостью интенсивности тока I от коэффициента электрической проводимости λ (аналогия коэффициенту фильтрации), разности ΔU потенциалов (аналогия разности напоров) и обратно пропорциональной длине пути электрического тока L (аналогия длины пути фильтрации). Закон Ома в более редкой записи выглядит так:

$$I = \lambda \cdot w \cdot \frac{\Delta U}{L}, \quad (3)$$

где w – площадь поперечного сечения среды, проводящей электрический ток. Нетрудно за-

метить, что интенсивность тока I аналогична фильтрационному расходу воды Q через пористую среду по формуле (1). Это обстоятельство позволяет применять аналогию при моделировании фильтрационных процессов при защите от подтопления.

При этом отметим, что привычный ещё со средней школы русский термин «сила тока» семантически не очень удачен, а более редкий термин «интенсивность тока» лучше соответствует принципу аналогии. В русской технической литературе как раз привился первый термин (сила тока), однако в иностранных источниках, особенно западноевропейских – второй (интенсивность тока), что более удачно в контексте нашей статьи для понимания рассматриваемых процессов. Кроме того, само обозначение I (intensity) придаёт более точный смысл закону Ома. В последней форме (3) закон Ома позволяет более обоснованно строить формулы моделирования течения электрического тока через проводящий грунт или искусственный материал. Аналогией водоупора для электричества при этом будет являться диэлектрик, то есть среда, не пропускающая электрический ток.

Есть ещё и третья аналогия – закон электроосмотической фильтрации воды, которая происходит преимущественно в глинистых грунтах, под влиянием разности потенциалов ΔU постоянного электрического тока. Закон электроосмоса открыл Ф.Ф. Рейс в 1807 г., проф. Московского университета.

Этот закон обычно формулируют так: скорость электроосмотической фильтрации воды V_3 пропорциональна коэффициенту электроосмотической фильтрации k_3 , разности потенциалов ΔU и обратно пропорциональна длине пути электроосмотической фильтрации L . Фильтрационный расход воды Q_3 через поперечное сечение пористого грунта или материала с площадью живого сечения w по закону электроосмотической фильтрации имеет вид

$$Q_3 = k_3 \cdot w \cdot \frac{\Delta U}{L}. \quad (4)$$

Нетрудно заметить, что последний закон (4) почти полностью повторяет закон ламинарной фильтрации Дарси (1), за исключением причины движения, в первом случае для воды в виде разности фильтрационных напоров ΔH , в во втором случае – электрических потенциалов ΔU . Поэтому на практике закон электроосмотической фильтрации применяют в геофизических исследованиях в ходе инже-

нерно-геологических изысканий. При этом его используют лишь по потребности.

Такая потребность, например, возникала в начале 1990-х гг. при инженерно-геологических изысканиях для омского метро при разработке мероприятий по защите от подтопления данного объекта строительства и прилегающей городской территории. В этих научных исследованиях автор принимал непосредственное участие как научный руководитель и ответственный исполнитель. В настоящее время отказ от строительства омского метро является глобальной ошибкой на будущее, так как г. Омск в последние годы «тонет» в автомобильных пробках. Наш прогноз на будущее такой – строительство Омского метрополитена со временем будет возобновлено. Это необходимо городу, однако проект метро в будущем может быть изменён с учётом новых технологий строительства, которые могут появиться.

При защите от подтопления в городском строительстве электроосмотическую фильтрацию применяют редко. Обычно такая фильтрация служит лишь в качестве дополнения к гравитационной фильтрации, происходящей по закону Дарси. Тем не менее следует подчеркнуть, что в глинистых грунтах это дополнение (электроосмос) по эффективности осушения грунта может превышать гравитационное дренирование, происходящее под влиянием силы тяжести [7].

При совместном использовании в осушаемом грунте сил гравитации и электрических сил постоянного тока суммарная скорость фильтрации складывается из составляющей по закону Дарси и другой составляющей скорости движения воды – электроосмотической фильтрации. Дополнительной особенностью совместного моделирования в пористой среде фильтрации воды и электроосмоса является то, что массив водоупорной части грунта и его части, относящейся к диэлектрику, могут не совпадать. Чаще всего так и случается. Например, грунтовые воды залегают на региональном водоупоре, а этот же водоупор, в частности глина, насыщен водой и проводит электрический ток. Такая сложность модели преодолевается её разбиением на модули, которые затем можно объединить с соблюдением балансового принципа, сшивая модули по границам.

Моделирование строительного водопонижения с учётом такого суммарного эффекта двух физических воздействий можно производить, оптимально сочетая высотное геометрическое расположение базисов дренирова-

ния и контактных электродов. При этом надо всегда иметь в виду следующие соображения. В первом случае, по закону Дарси, причиной движения воды является разность напоров. Во втором случае, при электроосмотической фильтрации, причина другая – разность электрических потенциалов. Важно так совместить оба процесса, чтобы они взаимно усиливали друг друга и чтобы в результате фильтрационные водопритоки к дренам и скважинам выросли до максимально возможных величин. Тогда будет достигнуто наибольшее осушение массива грунта основания, разрабатываемого в процессе производства строительных работ. Грунт станет более устойчивый на откосах котлованов и траншей. В результате уровень безопасности проведения земляных работ значительно повысится.

В ходе такой исследовательской работы, сопровождающей проектирование и сам технологический процесс строительного водопонижения, крайне желательно последовательно производить анализ и моделирование фильтрационных течений, происходящих на территории, в зданиях и сооружениях в период городского строительства. Первые оценочные расчёты движения воды в грунте или материале следует делать, применяя математический анализ. При этом рекомендуется строить самые простые геометрические схемы фильтрации с тем, чтобы сильно математику не усложнять.

Как обычно, наиболее простой расчётной схемой является одномерный фильтрационный стационарный процесс в декартовой системе координат. Решив такую простейшую задачу, дальше можно перейти, например, к одномерной осесимметричной постановке, при условии, что это соответствует геометрии строительного объекта и прилегающей территории. Это позволит более точно и, следовательно, более надёжно проводить расчёт и моделирование подтопления и дренирования объекта капитального строительства.

Следующим шагом дальнейшего усложнения (и уточнения) исследования подтопления является переход от стационарных задач к нестационарным. При этом необходимо учитывать время процесса осушения водоносного пласта, залегающего в основании строительного объекта. Для сравнения: в общей теории автоматического управления (ТАУ) такие процессы обычно называют переходными, а продолжительность перехода – временем установления.

На объектах защиты от подтопления установление нестационарных процессов дви-

жения подземных вод протекает не столь быстро, а иногда эти процессы вообще не устанавливаются. Это существенно зависит от граничных и начальных условий области фильтрации, то есть от её краевых условий. Кроме того, городское строительство обратно влияет на геологические процессы в грунтах оснований строительной площадки. Поэтому, сохраняя реалистичность, не во всех случаях необходимо проводить аналитические расчёты времени установления фильтрационных процессов.

Напротив, гораздо надёжнее построить постоянно действующую компьютерную нестационарную модель фильтрации подземных вод для объекта строительства и использовать её при осуществлении производства работ по защите от подтопления. В такую перманентную имитационную модель надо лишь время от времени вносить поправки на основе мониторинга (наблюдения) за гидрогеологией объекта городского строительства в ходе производимых работ. Для мониторинга можно использовать не только наблюдательные скважины, но и доступные выемки и понижения рельефа при условии, что они способны без искажения отражать поведение уровней подземных вод в геологическом массиве на исследуемой строительной площадке.

Рассмотрим особенности методологии теории и практики расчётов и моделирования электроосмотического водопонижения на основе упомянутых трёх законов: Дарси, Ома и электроосмотической фильтрации. Технологию обустройства электроосмотического водопонижения осуществляют в такой последовательности. Вначале надо наметить расположение водопонизительных скважин или дрена, а также положительных и отрицательных электродов в грунте для пропускания через него постоянного электрического тока. По закону электроосмоса фильтрация воды в грунте при воздействии поля постоянного электрического тока будет направлена в направлении к катоду, то есть к отрицательному электроду. В условиях строительной площадки напряжение электрического тока по условиям безопасности рекомендуется назначать в пределах 40–60 В, так принято в отечественной практике. В строительстве за рубежом этот диапазон ещё шире 15–100 В [8].

В качестве отрицательного электрода, к которому присоединяют электрический провод от соответствующего контакта источника постоянного тока, следует выбрать дрена или скважину, изготовленную из материала,

хорошо проводящего электрический ток. Величина электрической проводимости этого материала должна быть не меньше, чем у проводника (электрического провода). В противном случае может возникнуть нежелательное дополнительное сопротивление на дрене или скважине, что приведёт к неэффективному использованию электрической энергии при создании поля напряжений, достаточного для протекания процесса электроосмотической фильтрации в осушаемом грунте. Тогда затраты времени и средств на применение технологии электроосмоса с целью водопонижения и дренажа будут не рационально вышены.

В рамках рассматриваемой комплексной строительной технологии наиболее актуальным является осушение глинистых грунтов, глин и суглинков. Обычные методы водопонижения тут мало эффективны. Воздействие электроосмоса на глинистый грунт может существенно повысить его водоотдачу. Остаточную влажность глинистого грунта в конце периода водопонижения при воздействии электроосмоса можно рассчитать по рекомендациям Г.Н. Жинкина, изложенными в монографии [9]. Эта влажность глинистого грунта в ходе проектирования строительного водопонижения может быть определена по следующей формуле:

$$W_k = \frac{3 \cdot W_p + W_m}{4}, \quad (5)$$

где W_p – влажность предела раскатывания; W_t – влажность предела текучести.

В ходе производства водопонижения с применением электроосмоса водоотдача грунта увеличивается, грунт осушается более эффективно, чем без электроосмоса. При этом коэффициент водоотдачи глинистого грунта, обработанного электроосмосом, может быть записан в виде

$$\mu_{\text{э}} = W_{\text{оэ}} - W_{\text{ок}}, \quad (6)$$

где $W_{\text{оэ}}$ – объёмная влажность грунта в естественном состоянии; $W_{\text{ок}}$ – объёмная влажность этого же грунта на заключительном этапе строительного водопонижения с применением технологии электроосмоса.

Эффективность осушения глинистого грунта при действии электрического поля постоянного тока на данный грунт можно ещё более повысить. Для этого к массиву осушаемого грунта надо дополнительно приложить вакуум

в базисах дренирования установок строительного водопонижения. Вакуум можно обеспечить техническими средствами по двум возможным вариантам.

Первым вариантом создания вакуума может быть монтаж специальных насосов для создания вакуума, расположенных на поверхности земли. Таким способом обычно создают неглубокое водопонижение, в пределах нескольких метров глубины, например, с применением иглофильтров. Этот вариант не очень эффективен в силу своей ограниченности по глубине. Поэтому совмещать его с электроосмосом не рекомендуется.

Вторым вариантом является создание вакуума под уровнем земли в наиболее глубоких точках установок водопонижения, например, на уровне фильтров водопонижительных скважин. Этот вариант позволяет создать максимально глубокое водопонижение, так как точки приложения вакуума к водонасыщенной грунтовой массе будут находиться на самых низких высотных отметках. Техническим средством создания вакуума в этом случае могут быть водоструйные насосы (эжекторы), сопла которых принимают поток рабочей жидкости (воды), закачиваемой под напором с поверхности земли.

Второй вариант создания вакуума с технической точки зрения сложный, но более эффективный для водопонижения. В этом случае насосы должны быть применены двух разных типов. Первый тип насосов – водоструйные эжекторы. Они располагаются под землёй, в нижней части скважин. По конструкции они не имеют трущихся частей. Их основной деталью являются сопла. Такая конструкция достаточно надёжна и может работать с водой, содержащей частицы грунта. Второй тип – насосы, располагаемые на поверхности земли, по конструкции обычно центробежные, при этом, наилучшими являются фекальные насосы для перекачки загрязнённых жидкостей. Их задача заключается в создании напора рабочей жидкости (воды), которая не откачивается из скважины, а, наоборот, закачивается в неё под избыточным давлением. Достигая по первой трубе отметки низа скважины, рабочая жидкость проходит через сопло. Возникает вакуум, который через фильтр скважины распространяется в прилегающее пространство водоносного пласта, подлежащего осушению. Под влиянием вакуума приток подземных вод в скважину увеличивается. Эти воды поступают через фильтр в полость скважины, где расположен эжектор, и смешиваются с рабочей

жидкостью, вытекающей вертикально вверх из сопла. Далее смесь подземных вод и рабочей жидкости поднимается вверх по второй трубе на уровень поверхности земли и изливается в накопительный резервуар, откуда излишки воды самотёком отводятся в качестве дебита водопонижительной скважины.

Объединённый закон Дарси и электроосмоса для водонасыщенного глинистого грунта можно записать в следующем виде [8, 9, 10]

$$Q_o = w \cdot \left(\frac{k \cdot \Delta H}{L} + \frac{k_3 \cdot \Delta U}{L} \right), \quad (7)$$

где первая дробь в скобках – скорость фильтрационного течения воды по Дарси; вторая дробь – скорость движения воды в грунте под влиянием электроосмоса. В случае совпадения векторов обеих скоростей эффективность осушения грунта будет повышаться. Задача проектировщика данной технологии – обеспечить максимальное совпадение векторов обеих скоростей. Кроме того, в период строительства необходим технический контроль выполнения этого условия в условиях строительной площадки. С этой целью крайне желательна организация мониторинга процесса строительного водопонижения, например с помощью системы наблюдательных скважин.

Типичная установка строительного водопонижения с применением электроосмоса изображена на рисунке 1. Знаком «-» обозначены водопонижительные скважины, изготовленные из токопроводящего материала, обычно из стали. Это катоды, к которым происходит электроосмотическая фильтрация воды. Знаком «+» показаны аноды, то есть контакты, к

которым присоединяют положительный полюс источника постоянного тока.

В качестве анодов удобнее всего выбрать металлический стальной шпунт. Тогда он будет выполнять сразу две полезные функции, то есть служить электрическим контактом и удерживать от обрушения грунт на стенках траншеи или котлована. Уровень грунтовых вод (УГВ) обозначает свободную поверхность подземных вод со значением атмосферного давления. Выше УГВ расположена капиллярная зона неполного водонасыщения, поровое давление в которой ниже атмосферного. Грунтовые воды расположены между УГВ и водоупором. Водоупорная поверхность в данном примере схематизирована и совпадает с горизонтальной осью ξ .

На рисунке 1 горизонтальная координата ξ является обобщённой, при этом возможны два случая. На рисунке 1 горизонтальная координата ξ является обобщённой, при этом возможны два случая. В первом случае координата ξ является декартовой, которую обычно обозначают x . Этот случай относится к двухрядной установке строительного водопонижения, обычно для вытянутого объекта, например для прямолинейной траншеи. Это самая простая фильтрационная задача, которая является одномерной. Во втором случае координата ξ является радиальной, её принято обозначать как r . Данный случай относится к контурной установке строительного водопонижения. Эта фильтрационная задача является тоже одномерной, но в радиальной системе координат. Примером строительного объекта тут может быть котлован компактной формы в плане.

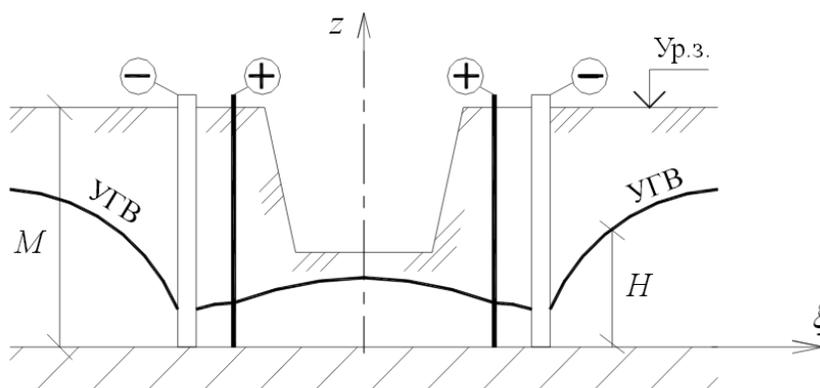


Рисунок 1 – Схема строительного водопонижения с применением электроосмоса

Figure 1 – Scheme of construction dewatering using electroosmosis

Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

В идеальном случае форма котлована в плане (на виде сверху) является круглой. Такие случаи редки, но всё же могут встречаться в строительной практике. Например, при производстве водопонижения для строящейся насосной станции, круглой в плане. В других случаях формы котлованов в плане могут быть не круглыми, а лишь компактными, но их можно условно сводить к круглому котловану. Для этого существуют специальные методики приведения реальных котлованов к условно круглым в плане.

Большинство этих методик используют приведение котлованов к условно круглым в плане, основанное на равенстве притоков подземных вод в реальный котлован и условно круглый. Однако в некоторых случаях производства водопонижения критическим показателем является не приток, а положение уровня подземных вод (УПВ). Например, при проведении строительно-монтажных работ в котловане положение УПВ при работе установки водопонижения должно быть не ближе 0,5 м. В таком случае критерии приведения к условно круглому котловану будут иные, они в основном не проработаны до сих пор. Это может быть одним из направлений дальнейших исследований.

Следует отметить два подхода к явлению электроосмотической фильтрации. Первый подход феноменологический, его сущность выражена формулой (4). Это оправдано хаотическим распределением пор в фильтрующих грунтах и материалах объекта строительства, поэтому параметры закона определяют экспериментальным путём. Данный подход получил широкое распространение в практике инженерно-геологических изысканий для строительства.

Важность этого подхода в настоящее время подтверждается популярностью публикаций в международных базах, таких как Scopus. Например, авторы из Чили [11] исследовали электроосмотический дренаж для свалок. Горнодобывающая промышленность является важнейшим видом экономической деятельности в Чили, которая является крупнейшим экспортером меди в мире. При этом горнодобывающая промышленность оказывает значительное воздействие на окружающую среду, например производит большое количество твердых отходов. Из-за высокого содержания влаги в твердых отходах на свалках могут возникать проблемы с физической стабилизацией вследствие того, что водные растворы удерживаются в твердых частицах,

которые не стекают под действием силы тяжести. Электроосмотический дренаж был предложен как метод уменьшения влажности и, таким образом, повышения устойчивости свалок. Авторы поставили вопрос, зависит ли объём осушенного раствора от процентного содержания мелких частиц в твёрдой породе. Представленная работа, основанная на экспериментальном материале, была произведена для решения данного вопроса. Результаты показали, что электроосмотический дренаж был более эффективным, чем гравитационный дренаж. Применительно к городскому строительству дренаж свалок весьма актуален.

Другой интересный пример применения электроосмоса представлен в статье [12] авторов из Ирана. Разработка высокоэффективных землеройных машин и механизмов с малым энергопотреблением имеет большое значение для строительства. Использование технологии электроосмоса, создающей на поверхности рабочего органа землеройных машин тонкую плёнку воды для уменьшения адгезии грунта привлекло внимание исследователей в последние два десятилетия. В статье исследован ковш для захвата грунта с оптимизированными рабочими параметрами. Экспериментальные результаты показали, что снижение адгезии грунта было наибольшим для ковша с соотношением площадей положительного/отрицательного электрода 1/4 и подачей на электроды 24 В в течение 30 с. Результаты также показывают, что при использовании технологии электроосмоса адгезия к грунту снизилась на 29,8–90% по сравнению с обычными технологиями разработки грунта. Попутно отметим, что идея встречалась ранее. Автор ещё в 1980-х гг. обсуждал практическое применение этого эффекта электроосмоса с омскими изыскателями при вытаскивании обсадных труб скважин из глинистых грунтов.

В ходе освоения технологии электроосмоса важно представлять область его применимости к различным грунтам и материалам. Авторы статьи [13] из Южно-китайского технологического университета обратили внимание на распределение размеров пор фильтрующей среды. Использован феноменологический подход. Проведены эксперименты на трех типах глинистой почвы с низкой проницаемостью. Предложена методика для расчёта электроосмотической проницаемости глинистого грунта.

Второй подход к электроосмотической фильтрации рассматривает движение воды под влиянием электрического тока в упорядоченном

доченной пористой среде. Характерным примером подобного исследования является методология, опубликованная в монографии К.П. Тихомоловой [14]. Такой подход более характерен для нужд химической промышленности. В частности, он применяется при изготовлении полимерных изделий для облегчения вытягивания волокон. Для целей строительства такой подход может найти применение в области искусственного улучшения свойств грунтов оснований с помощью обработки их полимерами. Направление это пока тоже мало исследовано.

Интересным направлением, развиваемым в настоящее время к решению проблемы подтопления, является ряд статей Е. Сериковой с соавторами по управлению рисками подтопления на городских территориях [15, 16]. Данное направление является новым и перекликается с направленностью нашей работы, так как применение электроосмоса при защите от подтопления тоже имеет определённый риск.

Небольшой обзор опубликованных материалов создаёт необходимую дискуссионную базу для дальнейшего обсуждения представленной работы по теме применения аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве.

ОБСУЖДЕНИЕ

Методология комплексного расчёта и моделирования совместных процессов фильтрации воды в грунтах, протекания электрического тока и электроосмотической фильтрации может найти полезное применение при разработке эффективной защиты от подтопления в городском строительстве.

Следует сразу оговорить, что рассматриваемая в данной работе аналогия фильтрации и электричества, описанная в предыдущем разделе, не имеет ничего общего с методом ЭГДА, то есть с электрогидродинамической аналогией. Метод ЭГДА впервые предложил Н.Н. Павловский [5] для моделирования напорной фильтрации воды при гидротехническом строительстве плотин. Вначале в качестве проводящей среды для электрического тока использовали жидкие электролиты. Затем в качестве проводящей среды стали применять электропроводную графитовую бумагу. Методом ЭГДА с помощью электричества моделировали чистую фильтрацию воды по закону Дарси (1). В нашей работе, напротив, рассматриваем смешанную фильтрацию воды, удовлетворяющую двум феноменологическим законам (1) и (4).

Важность технологии электроосмоса для моделирования строительного водопонижения и дренажа подчеркнём на примере расчёта, насколько электроосмотическая фильтрация увеличивает расход воды в сравнении с обычной фильтрацией по закону Дарси, произведённого нами в [7]. Коэффициент электроосмотической отдачи суглинка при действии на грунт постоянного электрического тока оказался примерно в 5 раз больше, чем коэффициент гравитационной водоотдачи этого же грунта без применения электричества. Поэтому дебиты скважин при действии электроосмоса соответственно возрастут приблизительно в 5 раз.

У некоторых исследователей возникают сомнения по поводу экономической целесообразности применения электроосмоса для защиты от подтопления, особенно в области дорожного строительства. Тут следует разграничить. Действительно, при постоянном электроосмотическом водопонижении, особенно в полевых условиях на дорогах в отсутствие линий электропередач, использование, например, генераторов электрического тока, работающих за счёт двигателей внутреннего сгорания, будет не рентабельно. Однако, в другом случае городского строительства, например, при возведении высотных зданий и сооружений, применение электроосмоса не просто будет осушать грунт в процессе земляных работ, но также существенно укрепит стенки грунтовых выработок. Поэтому экономическим эффектом в данном случае может быть предотвращённая катастрофа от обрушения уникального здания или сооружения. Тогда применение электроосмоса для строительного водопонижения будет несомненно экономически оправдано.

Продолжим обсуждение методологии моделирования по теме работы.

Используя классический метод конечных разностей (МКР), рассмотренные подходы можно использовать в современных компьютерных технологиях. Первоначально рекомендуется проводить грубое моделирование в электронных таблицах на персональных компьютерах и мобильных телефонах [17]. Далее следует применить другой подход моделирования. Базируясь на первоначальных грубых моделях предыдущего шага, надо записать алгоритмы МКР на языке программирования. При этом дальнейшая работа распадается на два последовательных шага.

Первый алгоритмический шаг. Вначале программный код лучше создать на языке

программирования интерпретирующего типа. В качестве такого языка в последнее время широкое распространение получил Python. Выбор языка зависит от личных предпочтений и привычек. Например, автору данной статьи достаточно быстро и надёжно удавалось прорабатывать алгоритмы моделирования на языке-интерпретаторе Visual Basic for Application, абсолютно совместимому с электронными таблицами Microsoft Excel. Программа-интерпретатор позволит создать прототипы алгоритмов, опробовать их на ряде тестовых задач, привязанных к конкретной строительной площадке.

Второй алгоритмический шаг. Имея разработанный на первом шаге программный алгоритмический код МКР-модели, можно переписать алгоритмы на языке программирования компилирующего типа. Это позволит создать исполняемый файл модели, скорость работы которого будет на несколько порядков больше по сравнению с моделью-интерпретатором. Скомпилированная модель исследуемых процессов фильтрации и электроосмоса позволит существенно повысить надёжность проектирования защиты от подтопления. Измельчая геометрический шаг МКР-сеток, увеличиваем точность модели. При этом исполняемый файл модели будет просчитан быстро и эффективно. Это и есть преимущества языков программирования компилирующего типа. В настоящее время наиболее удобным и эффективным языком программирования для целей нашего моделирования является современный Фортран, который снабжён встроенными средствами задания матриц. Эти средства позволяют задавать пространственные матрицы геометрических МКР-сеток непосредственно, без кропотливого набора в коде вложенных алгоритмических циклов.

За рубежом большее распространение для моделирования задач, связанных с электроосмосом, получил метод конечных элементов (МКЭ). Характерные примеры этого метода предоставляет следующая обзорная статья [18], а также [19, 20, 21, 22]. Методология МКЭ требует от исследователя более усиленной подготовки по математическому анализу в сравнении с МКР. Оба метода дают возможность моделирования по тематике данной статьи, но их дальнейшее детальное обсуждение настолько обширно, что следует перенести его на последующие публикации.

Автор, по своим предпочтениям, рекомендует использовать МКР-модели, так как при их построении балансый принцип выражен бо-

лее очевидно, чем у МКЭ-моделей. При этом исследователь в ходе моделирования скважин обязательно столкнётся с проблемой точного задания напора в узле сетки (рисунок 2). Эту особенность рассмотрим детально. Данное исследование предпринято впервые в методологии МКР-моделирования.

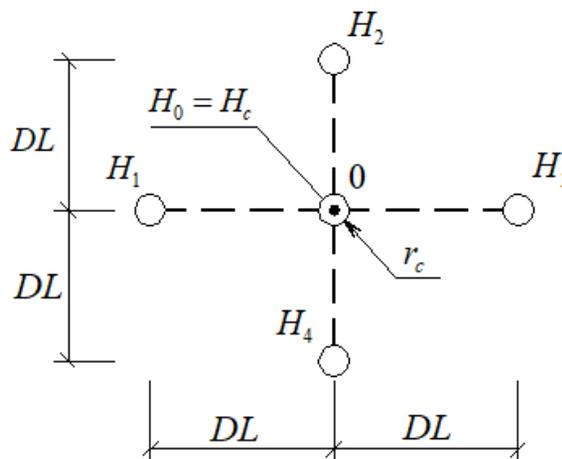


Рисунок 2 – Схема моделирования скважины в узле разностной сетки

Figure 2 – Scheme of well simulation at difference grid node
Источник: составлено автором
Source: compiled by the author

Для исследования принимаем наиболее распространённый случай двумерной квадратной МКР-сетки со сторонами квадрата DL . Предположим, что скважина радиусом r_c идеально попала в пересечение границ сетки в точке 0. Рисунок 2 надо представлять двояко.

Первым представлением рисунка 2 является гидрогеологический подход, когда рядом со скважиной по четырём сторонам света находятся 4 наблюдательных скважины-пьезометра в водоносном пласте с напорами соответственно H_1, H_2, H_3, H_4 . Тогда расход воды, притекающей к скважине по формуле Дюпюи можно записать в виде

$$Q_c = \frac{2\pi kM(H_K - H_c)}{\ln\left(\frac{DL}{r_c}\right)}, \quad (8)$$

где k – коэффициент фильтрации грунта; M – толщина обводнённого слоя грунта; остальные обозначения показаны на рисунке 2.

Здесь также введено выражение напора на контуре вокруг скважины

$$H_K = H_1 + H_2 + H_3 + H_4.$$

Вторым представлением рисунка 2 является конечно-разностный подход с учётом закона Дарси, согласно которому расход воды, притекающей к скважине, можно записать в виде

$$Q_c = kMDL \frac{H_1 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_2 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_3 - H_c}{DL} + kMDL \frac{H_4 - H_c}{DL} = 4kM(H_K - H_c). \quad (9)$$

Сопоставляя (8) и (9), выразим радиус скважины

$$r_c = DL \cdot \exp\left(\frac{-\pi}{2}\right). \quad (10)$$

Выражение (10) является точным. Его при моделировании удобно задавать программным путём либо с помощью функционала электронных таблиц. Для сравнения приведём хорошо известную приближённую зависимость, обычно используемую в практике гидрогеологического моделирования:

$$r_c = 0,2 \cdot DL.$$

Преимуществом выражения (10) является то, что оно не приводит к накоплению систематической ошибки около 5% в ходе моделирования в рамках рассматриваемой темы применения аналогии фильтрации и электричества при моделировании защиты от подтопления в городском строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-новому дано сравнение совместного применения средств строительного водопонижения разной физической сущности, при одновременных процессах гравитационной фильтрации подземной воды и пропускании постоянного электрического тока через осушаемый грунт, что вызывает дополнительный эффект электроосмоса. Предложено применять аналогию фильтрации воды и электрического тока с целью достижения более эффективных результатов инженерной деятельности путём защиты от подтопления территорий застройки, обеспечивая безопасность городского строительства при повышении уровня подземных вод. Записав закон Ома аналогично закону фильтрации Дарси, достигнуто лучшее понимание их аналогии. Это даёт возможность в перспективе дальнейших исследований развивать новые технологии для защиты от подтопления в городском строительстве, особенно электроосмотическое водопонижение и его моделирование. Методология моделирования

дополнена конкретными алгоритмическими шагами, позволяющими постепенно прорабатывать виртуальное отображение процессов фильтрации, происходящих на строительной площадке. В частности, предложено точно задавать напор в моделируемых скважинах. Представленные результаты исследований позволяют более эффективно осушать глинистые грунты, что обычно не удаётся стандартными методами водопонижения с использованием гравитационного водоотлива и дренажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павилонский В.М. Метод определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та «ВОДГЕО». 1964. №7 С. 59–79.
2. Павилонский В.М. Исследование метода уплотнения на коэффициент фильтрации глинистых грунтов // Труды ин-та «ВОДГЕО». 1972. №35. С. 45–50.
3. Павилонский В.М. Противофильтрационные устройства накопителей отходов промышленных предприятий // Исследования хвостохранилищ и накопителей промстоков. 1982. С. 12–28.
4. Olsen H.W. Darcy's law in saturated kaolinite // Water Resources Res. – 1966, 2. – P. 287-296.
5. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и её основные приложения: монография. Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института. 1922. 752 с.
6. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, 1972. 764 pp.
7. Сологаев В.И. Фильтрационные расчёты и моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: СибАДИ. 2002. 416 с.
8. Кнауэ В. Устройство котлованов и водопонижение: монография / Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1988. 376 с.
9. Жинкин Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве: монография. – Л.-М.: Стройиздат. 1966. 196 с.
10. Сологаев В.И. О применении электроосмоса при защите от подтопления земель // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (27). С. 122–128.
11. Cánovas M., Valenzuela J., Romero L., González P. Characterization of electroosmotic drainage: Application to mine tailings and solid residues from leaching // Journal of Materials Research and Technology. Volume 9, Issue 3. Elsevier Editora Ltda, 2020, P. 2960-2968. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.046.
12. Massah J., Rahmani Fard M., Aghel H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction // Journal of Terramechanics. Volume 95. Elsevier Ltd, 2021, P. 1-6. DOI: 10.1016/j.jterra. 2021.01.003.
13. Zhou H.A, Fang Y.B, Chen M.C, Gu R.C, Li W.B. Experimental and analytical study on electro-

osmosis in low-permeability soil considering the pore size effect // *Geotechnique*. Volume 71. ICE Publishing, 2021. P. 141-152. DOI: 10.1680/jgeot.18.P.362.

14. Тихомолова К.П. Электроосмос: монография. Л.: Химия. 1989. 248 с.

15. Sierikova E., Strelnikova E., Pisia L., Pozdnyakova E. Flood risk management of Urban Territories // *Eco. Env. & Cons.* 26 (3) : 2020; pp. 1068-1077.

16. Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the kharkiv city flooding areas example // *Noble International Journal of Scientific Research*. 3(8) : 2019; pp. 72-78.

17. Сологаев В.И., Золотарев Н.В. Моделирование радиальной фильтрации методом электронных таблиц на мобильных телефонах // *Омский научный вестник*. 2011. № 1 (97). С. 198–200.

18. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electro-osmotic flow in porous media // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 28 (2), 2018, pp. 472-497. DOI: 10.1108/hff-11-2016-0437.

19. Liang M., Yang S., Yu B. Analysis of electroosmotic characters in fractal porous media // *Chemical Engineering Science*. Volume 127, 4 May 2015, Pages 202-209. DOI:10.1016/J.CES.2015.01.030.

20. Cheema T.A., Kim K.W., etc. Numerical Investigation on Electroosmotic Flow in a Porous Channel // *The 1st IEEE/IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing*. 2013. Pp. 79-82. DOI:10.12792/ICISIP2013.019.

21. Chena S., Hea X., etc. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson–Boltzmann method // *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 436, 15 December 2014. Pp. 186-193. DOI:10.1016/j.jcis.2014.08.048.

22. Cameselle C. Enhancement Of Electro-Osmotic Flow During The Electrokinetic Treatment Of A Contaminated Soil // *Electrochimica Acta*. Volume 181, 1 November 2015, pp. 31-38. DOI:10.1016/J.ELECTACTA.2015.02.191.

REFERENCES

1. Pavilonskiy V.M. Metod opredeleniya koeffitsiyenta fil'tratsii glinistykh gruntov [Method for determining the filtration coefficient of clay soils] // *Trudy in-ta «VODGEO»*, vyp. 7. – M.: VNII VODGEO, 1964: 59-79. (In Russian).

2. Pavilonskiy V.M. Issledovaniye metoda uplotneniya na koeffitsiyent fil'tratsii glinistykh gruntov [Investigation of the compaction method on the filtration coefficient of clay soils]// *Trudy in-ta «VODGEO»*, vyp. 35: *Gidrogeologiya*. – M.: VNII VODGEO, 1972: 45-50. (In Russian).

3. Pavilonskiy V.M. Protivofil'tracionnyye ustroystva nakopiteley otkhodov promyshlennykh predpriyatiy [Anti-filtration devices of waste storage facilities of industrial enterprises] // *Issledovaniya khvostokhranilishch i nakopiteley promstokov*. M.: VNII VODGEO, 1982: 12-28. (In Russian).

5. Pavlovskiy N.N. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod pod gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami i yeyo osnovnyye prilozheniya: Monografiya. *Petrograd: Izdvo Nauchno-melioratsionnogo instituta*, 1922. 752 s. (In Russian).

6. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, 1972.764 pp.

7. Sologae V.I. Fil'tratsionnyye raschoty i modelirovaniye pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve [Filtration calculations and modeling for flood protection in urban construction: Monografiya. *Omsk: SibADI*, 2002: 416 (In Russian).

8. Knaupe V. Ustroystvo kotlovanov i vodoponizheniye [Construction of pits and water reduction]: Monografiya / Per. s nem. – M.: *Stroyizdat*, 1988. – 376 s. (In Russian).

9. Zhinkin G.N. Elektrokhimicheskoye zakrepleniye gruntov v stroitel'stve [Electrochemical fixing of soils in construction]: Monografiya. – L.-M.: *Stroyizdat*, 1966. – 196 s. (In Russian).

10. Sologae V.I. O primenenii elektroosmosa pri zashchite ot podtopleniya zemel' // *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – Omsk: OmGAU, 2017. – Vyp. 3 (27). – S. 122-128. (In Russian).

11. Cánovas M., Valenzuela J., Romero L., González P. Characterization of electroosmotic drainage: Application to mine tailings and solid residues from leaching // *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 9, Issue 3. Elsevier Editora Ltda, 2020, P. 2960-2968. DOI: 10.1016 / j.jmrt.2020.01.046.

12. Massah J., Rahmani Fard M., Aghel H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction // *Journal of Terramechanics*. Volume 95. Elsevier Ltd, 2021, P. 1-6. DOI: 10.1016 / j.jterra. 2021.01.003.

13. Zhou H.A, Fang Y.B, Chen M.C, Gu R.C, Li W.B. Experimental and analytical study on electro-osmosis in low-permeability soil considering the pore size effect // *Geotechnique*. Volume 71. ICE Publishing, 2021. P. 141-152. DOI: 10.1680 / jgeot.18.P.362.

14. Tikhomolova K.P. Electroosmos: Monografiya. - L.: Chemistry, 1989. - 248 p.

15. Sierikova E, Strelnikova E., Pisia L., Pozdnyakova E. Flood risk management of Urban Territories // *Eco. Env. & Cons.* 26 (3): 2020; pp. 1068-1077.

16. Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the kharkiv city flooding areas example // *Noble International Journal of Scientific Research*. 3 (8): 2019; pp. 72-78.

17. Sologae V.I., Zolotarev N.V. Modelirovaniye radial'noy fil'tratsii metodom elektronnykh tablits na mobil'nykh telefonakh [Modeling of radial filtering by the spreadsheet method on mobile phones]// *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2011. 1 (97):. 198-200. (In Russian).

18. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electro-osmotic flow in porous media // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 28 (2), 2018, pp. 472-497. DOI: 10.1108 / hff-11-2016-0437.

19. Liang M., Yang S., Yu B. Analysis of electroosmotic characters in fractal porous media // *Chemical*

Engineering Science. Volume 127, 4 May 2015, Pages 202-209. DOI: 10.1016 / J.CES.2015.01.030.

20. Cheema T.A., Kim K.W., etc. Numerical Investigation on Electroosmotic Flow in a Porous Channel // The 1st IEEE / IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing. 2013. Pp. 79-82. DOI: 10.12792 / ICISIP2013.019.

21. Chena S., Hea X., etc. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson – Boltzmann method // Journal of Colloid and Interface Science. Volume 436, 15 December 2014. Pp. 186-193. DOI: 10.1016 / j.jcis.2014.08.048.

22. Cameselle C. Enhancement Of Electro-Osmotic Flow During The Electrokinetic Treatment Of A Contaminated Soil // Electrochimica Acta. Volume 181, 1 November 2015, pp. 31-38. DOI: 10.1016 / J.ELECTACTA.2015.02.191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. кафедры «ГСХН» ORCID 0000-0002-2553-9892 (644080, г. Омск, пр. Мира 5, sologaev_vi@cdo.sibadi.org).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valery I. Sologaev, Dr. of Sci., Professor of the Urban Construction, Management and Real Estate Expertise Department, ORCID 0000-0002-2553-9892 Siberian State Automobile and Highway University, 644080, Russia, Omsk, 5 Mira Avenue, sologaev_vi@cdo.sibadi.org.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1. УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов 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 упоминании должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисовочной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.