



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



научный рецензируемый журнал

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

**СИБАДИ** •

“Vestnik SibADI”

Том 17, № 1. 2020  
Сквозной номер выпуска – 71

Vol. 17, no. 1. 2020  
Continuous issue – 71

наука  
science

creation  
творчество

образование  
education

innovations  
инновации

technology  
технологии

tradition  
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)  
ISSN 2658-5626 (Online)  
DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1

# **ВЕСТНИК СИБАДИ**

## **THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL**

**DOI 10.26518/2071-7296**

**ТОМ 17, № 1. 2020. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 71  
(VOL. 17, NO. 1. 2020. CONTINUOUS ISSUE – 71)**

**Учредитель и издатель:**

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

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

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

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

Издается с 2004 года  
Периодичность издания – 6 раз в год  
Подписной индекс в каталоге  
ОАО Агентство «Роспечать» 66000

**Founder and Publisher:**

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

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

**EDITORIAL POSTAL ADDRESS**

644080, Omsk, 5, Mira Ave.  
Phone: +7 (3812) 65-88-30  
Published since 2004  
by 6 issues per year

Subscription index is 66000  
in the Rospechat Agency's catalog

[www.vestnik.sibadi.org](http://www.vestnik.sibadi.org)  
e-mail: [vestnik\\_sibadi@sibadi.org](mailto:vestnik_sibadi@sibadi.org)

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

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

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

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

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

05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),

05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),

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

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

#### **Журнал индексируется и архивируется:**

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНИТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка».

#### **Журнал является членом:**

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

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 21.02.2020. Дата выхода в свет 25.02.2020. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная.

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

Контент доступен под лицензией

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

05.22.10 – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

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

05.23.05 – Building materials and products (Technical Sciences),

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

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

*The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS - 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the [vestnik.sibadi.org](http://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 21.02.2020. Publication date is 25.02.2020. Format is 60 × 84 1/4.

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

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

Content is available under license.

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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2020

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

### **Транспортное, горное и строительное машиностроение**

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

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

### **Транспорт**

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

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

### **Строительство и архитектура**

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

**Горынин Глеб Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРПЫ», г. Сургут, Россия  
*Scopus Author ID 10040194400*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Макеев Сергей Александрович**, д-р техн. проф. наук Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия  
*ORCID 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 0000-0002-4034-2457*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Куприна Татьяна Васильевна**  
редактор-ответственный секретарь  
*e-mail: vestnik\_sibadi@sibadi.org*

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

**Кенжалинова Наталья Валерьевна** переводчик  
*e-mail: zero\_natasha@mail.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 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 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 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 the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

*Scopus Author ID 16526820600*

**Evgeniy E. Vitvitskiy**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of 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 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 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 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, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

*Scopus Author ID 6506823308*

**Pavel A. Korchagin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of 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 the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

*ORCID ID 0000-0002-2915-982X*

**Sergey A. Matveev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, 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 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 the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

*Scopus Author ID 6507433262*

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

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

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

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

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

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

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

**Sergey V. Saveliev**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia  
*Scopus Author ID 57159787800, ORCID ID 0000-0002-4034-2457*

**Václav Skala**, Professor of the West Bohemia University, Plzen, 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 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, Białystok, Poland  
*Scopus Author ID 9843546900, Researcher ID N-3447-2017, ORCID ID 0000-0001-7052-9602*

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

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

**Tatyana V. Kuprina**  
Executive Journal Secretary  
*e-mail: vestnik\_sibadi@sibadi.org*

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

**Natalia V. Kenzhalinova**  
Journal Interpreter *e-mail: zero\_natasha@mail.ru*

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

## РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*Демиденко А.И., Кузнецов И.С.*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА..... 12**

*Карамгужинова А.Е., Кузнецова В.Н., Савинкин В.В., Коптяев Д.А.*

**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОГИДРОЦИЛИНДРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ..... 22**

*Николаев В.А.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЦЕПЕЙ И РАЗМЕРОВ ПЛАСТА ГРУНТА,  
ОТРЕЗАЕМОГО КОВШОМ АГРЕГАТА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ГРУНТА  
С ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ ..... 32**

*Потахов Д.А.*

**ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ СОПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРА ВЫВЕШИВАНИЯ..... 44**

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

*Демидов Н.Н., Красильников А.А., Худорожков С.И.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ  
В КОРОБКЕ ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ ТРАКТОРА ..... 58**

*Зедгенизов А.В., Базан А.В.*

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТРЕБНОГО ЧИСЛА МЕСТ ДЛЯ ПАРКИРОВАНИЯ ВОЗЛЕ  
ЦЕНТРОВ МАССОВОГО ТЯГОТЕНИЯ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ..... 72**

*Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И.*

**К ВОПРОСУ ВЫБОРА СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ..... 84**

*Курганов В.М., Грязнов М.В., Давыдов К.А.*

**НАДЕЖНОСТЬ И СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ НА ПЕРЕВОЗКИ ПассажиРОВ  
В ГОРОДАХ С ГРАДООБРАЗУЮЩИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ..... 98**

*Якимущин Р.В.*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ ВОЗДУХОМ..... 110**

## РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Воронов В.В., Глаголев Е.С.*

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ПЕНОБЕТОНОВ ..... 122**

*Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г.*

**УЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ  
В РАСЧЕТАХ СОСТАВНЫХ ПРОГОНОВ ИЗ БРЕВЕН ..... 136**

## PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

*Anatoly I. Demidenko, Ilya S. Kuznetsov*

**IMPROVEMENT OF THE HYDRAULIC EXCAVATOR'S WORKING EQUIPMENT..... 13**

*Aigul E. Karamguzhinova, Victoria N. Kuznetsova, Vitaliy V. Savinkin, Dmitriy A. Koptyaev*

**ELECTROHYDROCYLINDER OF INCREASED EFFICIENCY:  
PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MECHATRONIC SYSTEMS ..... 23**

*Vladimir A. Nikolayev*

**SOIL LAYER CUT OFF BY THE AGGREGATE FOR REMOVING THE TOPSOIL FROM  
THE ROAD SUBLAYER: DETERMINATION OF THE CHAIN SPEED AND SIZES ..... 33**

*Denis A. Potakhov*

**STRESSED-DEFORMED STATUS OF THE HANGING HYDROCYLINDER:  
INFLUENCE OF THE CONJUGATED ELEMENTS' PAIRS ..... 45**

## PART II. TRANSPORT

*Nikolay N. Demidov, Andrey A. Krasilnikov, Sergey I. Hoodorozhkov*

**TRACTOR GEARBOX: RESEARCH OF SHIFTING GEARS' PROCESSES..... 59**

*Anton V. Zedgenizov, Alexei V. Bazan*

**PARKING SPACES NEAR MASS GRAVITY CENTERS IN URBANIZED TERRITORIES:  
METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE REQUIRED PLACES ..... 73**

*Aleksei N. Kotomchin, Anatoly F. Sinelnikov, Nikolai I. Korneychuk*

**RESTORATION OF MACHINE PARTS: CHOICE OF THE METHOD..... 85**

*Valery M. Kurganov, Mikhail V. Gryaznov, Kirill A. Davydov*

**CITY-FORMING ENTERPRISES: RELIABILITY AND REDUCED COSTS  
OF THE PASSENGERS' TRANSPORTATION ..... 99**

*Roman V. Yakimushkin*

**VORTEX DEVICES OF THE DIESEL AIR SUPPLY SYSTEM: MATHEMATICAL MODEL  
OF AERODYNAMIC PROCESSES .....111**

## PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

*Vasily V. Voronov, Evgeny S. Glagolev*

**POLYMINERAL COMPOSITE BINDERS FOR FOAM CONCRETE:  
FEATURES OF HYDRATION AND HARDENING ..... 123**

*Vladimir A. Utkin, Pavel N. Kobzev, Elena G. Shatunova*

**COMPOUND RUNS OF LOGS CALCULATION:  
ACCOUNTING OF LONGITUDINAL FORCES' AND BENDING MOMENTS' INTERACTION .... 137**



А.П. Жигадло,  
главный редактор

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В 2020 году Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет отмечает 90 лет со дня основания.

Эту дату вуз встречает с полной готовностью послед-

овательно реализовывать задачи, определенные в Стратегии научно-технологического развития, Национальных проектах, Послании Президента Федеральному Собранию РФ. Все это способствует глобальному обмену научными знаниями, именно с этой целью в 2004 г. СиБАДИ учредил журнал «Вестник СиБАДИ».

Сохранив историческую индивидуальность, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет сегодня признанный бренд качественного инженерного образования. Приоритетное направление образовательной, научной и инновационной деятельности вуза – обеспечение высококвалифицированными кадрами в первую очередь предприятий дорожно-транспортной и строительной отраслей, а также передовыми технологиями, техническими решениями и разработками мирового уровня. За 90-летнюю историю СиБАДИ не поменял свою профильную направленность и сегодня является в России одним из базовых и единственным за Уралом.

Сегодня, отвечая вызовам времени, мы продолжаем активно двигаться вперед, реализуя научно-образовательную деятельность в лучших традициях своей славной истории,

внедряя инновационные технологии, развивая стратегическое партнерство, участвуя в реализации приоритетных национальных проектов, принимая на себя миссию социального и экономического развития государства.

Наш университет в числе первых включился в технологическую повестку развития новых подходов в образовании, науки, социальной сферы и городской среды, а также в распространение лучших практик цифровой трансформации.

Желаю вам значимых научных открытий, а нашему журналу – занять достойное место среди ведущих научных изданий.



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



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

УДК 622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

А.И. Демиденко, И.С. Кузнецов\*  
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,  
г. Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Возрастной состав магистральных трубопроводов России значительно превышает срок их нормативной эксплуатации, что обуславливает необходимость обеспечения их надежной, безаварийной работы порой в сложных природных условиях. От качества и скорости проведения ремонтных работ зависит своевременная поставка требуемого количества углеводородного сырья в различные районы нашей страны и зарубежья. Скорость проведения капитального ремонта трубопровода, который заключается в замене старых труб на новые, зависит от эффективности всей ремонтной колонны в целом. Основной машиной для проведения земляных работ является одноковшовый гидравлический экскаватор. С его помощью происходит удаление грунта с обеих сторон от трубопровода, но существует проблема выемки грунта под трубопроводом. Существующие решения проблемы обладают высокой сложностью, что только затрудняет процесс ремонта. В связи с этим было разработано рабочее оборудование экскаватора, которое устанавливается после откапывания прямых траншей.

**Материалы и методы.** Выполнен обзор и анализ существующих конструкций оборудования для разработки грунта под трубопроводом. Обозначены их ключевые недостатки. Разработана новая конструкция сменного рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Проведен расчет основных силовых параметров.

**Результаты.** Приведено подробное описание конструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора и принципа его работы. На основе силового и гидравлического расчета был выбран гидромотор для привода фрезерной головки.

**Обсуждение и заключение.** Предложенное техническое решение позволит исключить выемку грунта из-под магистрального трубопровода при помощи шанцевого инструмента или сложных технических устройств. Это значительно повысит эффективность земляных работ и темп проведения ремонта трубопровода работ в целом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экскаватор гидравлический, оборудование рабочее, фреза роторная, стрела телескопическая, трубопровод, ремонт, подкоп, грунт, эффективность.

Поступила 06.10.2019, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы благодарят за поддержку научных исследований коллектив кафедры «ТНКИ» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Для цитирования: Демиденко А.И., Кузнецов И.С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора. Вестник СибАДИ. 2020; 17(1):12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>

© Демиденко А.И., Кузнецов И.С.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>

## IMPROVEMENT OF THE HYDRAULIC EXCAVATOR'S WORKING EQUIPMENT

Anatoly I. Demidenko, Ilya S. Kuznetsov\*

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),  
Russia, Omsk

### ABSTRACT

**Introduction.** The age composition of the main pipelines of Russia significantly exceeds the period of their standard operation, which necessitates the provision of their reliable, trouble-free operation sometimes in difficult environmental conditions. Timely delivery of the required amount of hydrocarbon raw materials to various regions of our country and abroad depends on the quality and speed of the repair work. The speed of the pipeline overhaul, which consists in replacing old pipes with new ones, depends on the effectiveness of the entire repair string as a whole. The main excavation machine is a hydraulic excavator. Soil is removed on both sides of the pipeline, but there is a problem of excavation under the pipeline. Existing solutions to the problem are highly complex, which only complicates the repair process. Therefore, the authors develop the working equipment of the excavator, which is installed after digging the pits of the trench.

**Materials and methods.** The authors performed a review and analysis of existing equipment designs for the soil development under the pipeline. Moreover, the authors developed a new design of interchangeable working equipment for a single-bucket excavator.

**Results.** As a result, the authors presented a detailed description of the working equipment of a single-bucket excavator and the principle of its operation.

**Discussion and conclusions.** The proposed technical solution allows excluding excavation under the main pipeline, which is carried out using a trench tool. This method significantly increases the efficiency of excavation and the pace of repair work as a whole.

**KEYWORDS:** hydraulic excavator, working equipment, rotary milling cutter, telescopic boom, pipeline, repair, undermining, soil, efficiency.

**Submitted 06.10.2019, revised 21.02.2020.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors express their gratitude to the staff of the Department of the Machine for the Construction and Maintenance of Oil and Gas Complexes and Infrastructures in the Siberian Automobile and Highway University and to the reviewers of the paper.

*For citation:* Demidenko Anatoly I., Kuznetsov Ilya S. Improvement of the hydraulic excavator's working equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>

© Demidenko A. I., Kuznetsov I. S.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Сеть магистральных трубопроводов, в том числе нефте- и газопроводов, в Российской Федерации составляет тысячи километров. Существующие магистральные трубопроводы перекачивают значительные объемы углеводородов под высоким давлением при больших диаметрах труб [1, 2, 3, 4]. Строительство и ремонт трубопроводной системы в связи с обширностью территории России осуществляется в различных климатических условиях, в том числе на Крайнем Севере и в приарктической зоне [5, 6, 7]. При этом безопасная и эффективная эксплуатация магистральных нефтегазопроводов зависит от множества факторов, возникающих при строительстве, техническом обслуживании и ремонте<sup>1</sup>. При своевременном и грамотном подходе к техническому обслуживанию эксплуатационные расходы на проведение работ по капитальному ремонту будут значительно ниже [8, 9, 10, 11].

Капитальный ремонт требует высоких материальных вложений и является более затратным, чем процесс строительства магистрального трубопровода<sup>2</sup> [12, 13, 14]. Современные подземные магистральные трубопроводы большого диаметра и высокого давления имеют ряд особенностей, которые требуют особого подхода к организации и технологии строительства, механизации всего комплекса работ, а также исследованию района строительства [15, 16, 17, 18, 19]. Поддержание высоких темпов проведения работ по капитальному ремонту во многом зависит от эффективности используемого технологического оборудования.

Основные земляные работы, производимые при капитальном ремонте линейной части магистральных трубопроводов, осуществляются в два этапа:

- 1) предварительное вскрытие трубопровода, при котором оставляют неудаленным слой грунта в непосредственной близости к трубопроводу для исключения его повреждения;
- 2) удаление оставшегося грунта по периметру трубопровода, что значительно увеличивает

трудоемкость технологического процесса, осуществляемого шанцевым инструментом при ограниченном доступе к разрабатываемому грунту.

Основной машиной для освобождения трубопроводов от грунта является одноковшовый экскаватор [20]. Он позволяет удалить грунт с обеих сторон от трубопровода, но при этом существует проблема выемки грунта из-под трубы. В связи с этим возникла необходимость создания современного рабочего оборудования на базе одноковшового экскаватора для разработки грунта под трубопроводом. Нередко трубопроводы, требующие ремонта, заменяют на новые [21]. Поэтому нет необходимости удалять грунт из-под трубы на всем ее протяжении, достаточно лишь через определенные промежутки производить подкоп для подведения полотенец трубоукладчика, необходимых для подъема заменяемой трубы. Следовательно, наиболее эффективным будет использование сменного рабочего оборудования экскаватора, находящегося в ремонтной колонне.

Ниже приведен обзор и анализ некоторых конструкций оборудования для разработки грунта под трубопроводом.

При использовании рабочего оборудования<sup>3</sup> во внутренней полости рабочего клинообразного наконечника находится пружинный механизм, который позволяет разводить дополнительные грани в стороны и дает возможность расширить скважину под трубопроводом. Когда рабочий клинообразный наконечник выходит с противоположной стороны, пружинный механизм разводит дополнительные грани, затем при подаче рабочей жидкости в штоковую полость гидроцилиндра происходит движение рабочего клинообразного наконечника в обратном направлении, расширяя уже образованную скважину под трубой при помощи дополнительных граней. Недостатками такого способа является плохая видимость рабочего процесса подкопа трубопровода, а также низкая эффективность при работе с глинистыми и мерзлыми грунтами.

<sup>1</sup> Энергетическая стратегия России до 2030 года [Электронный ресурс]: утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р. Доступ из справочной правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 02.09.2019).

<sup>2</sup> Капитальный ремонт линейной части магистральных газонефтепроводов: учебное пособие для вузов / под ред. Н.Х. Халпышева. 2-е изд., перераб и доп. М.: МАКС Пресс, 2011. 448 с.

<sup>3</sup> Пат. № 2550307: МПК Е 02 F 3/28 : Рабочее оборудование одноковшового экскаватора / А.И. Демиденко, И.С. Мораш; СибАДИ. 2013112305/03; заявл. 19.03.13; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17.

Система для выемки грунта из-под заглубленной трубы<sup>4</sup> содержит пару вращающихся режущих механизмов, удерживаемых с возможностью охвата сверху проложенной под землей трубы, причем каждый такой механизм содержит приводные средства. Когда вращающиеся режущие механизмы находятся в закрытом положении, соответствующие оси вращения данных механизмов отклонены от вертикальной оси таким образом, что их выступающие концы обращены внутрь. Благодаря такому расположению разработанный грунт может плавно удаляться по диагонали вниз под действием силы тяжести. Недостатками данного метода являются сложность конструкции и трудоемкость при проведении сервисных работ.

Рабочее оборудование экскаватора<sup>5</sup> обеспечивает возможность разработки грунта параллельно продольной оси и разгрузки грунта с любой стороны экскаватора. При помощи гидроцилиндра поворота двухшарнирной вставки, установленной между ковшем и рукоятью, существует возможность отклонения ее продольной оси в плоскости поворота на угол вплоть до 90° в каждую из сторон от среднего положения. Такая схема рабочих органов позволяет эффективно вести подкоп трубопровода при его ремонте. Недостатками являются малая обзорность и сложность технологического процесса при малой ширине траншеи, поэтому существует вероятность повреждения трубопровода рабочим органом машины.

Анализ другого существующего рабочего оборудования для разработки грунта под трубопроводом показал наличие следующих основных недостатков их конструкции и эксплуатации:

- не обеспечена безопасность рабочего процесса, что может привести к простоям ремонтно-строительной колонны и дополнительным экономическим издержкам;
- недостаточно обеспечена мобильность и производительность машины, что является сдерживающим фактором для движения ремонтно-строительной колонны;

- у некоторых конструкций оборудования высокая сложность и металлоемкость;

- во время рабочего процесса оказывается силовое воздействие на трубопровод, что может привести к его деформации.

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для решения выявленных недостатков была разработана сменная оснастка в виде роторной фрезы, размещенной на телескопическом гидроцилиндре<sup>6</sup>.

Рабочее оборудование экскаватора включает стрелу 1, гидроцилиндр управления рукоятью 2, рукоять 3, гидроцилиндр управления оборудованием 4, рычаги 5 и 6, соединенные с гидроцилиндром управления 4, телескопический цилиндр 8, удерживаемый кронштейном 7, шарнирно соединенным с рукоятью 3 и рычагом 6. На конце телескопического цилиндра 8 закреплен гидравлический привод 9 с фрезерной головкой 10, на которой расположены резцы 11 и шнек 12 (рисунок 1).

После откапывания трубопровода сверху и с обеих сторон ковш экскаватора заменяется на роторную фрезу. Перед началом выполнения непосредственно подкопа трубопровода рукоять и стрела экскаватора располагаются перпендикулярно трубопроводу. Шток гидроцилиндра управления оборудованием 4 максимально выдвинут, рабочий орган опущен. Затем происходит опускание рабочего оборудования в приямок траншеи. Движением штока гидроцилиндра 4 вверх происходит поворот телескопического цилиндра и рабочего оборудования на угол 90° к разрабатываемому грунту, находящемуся под трубопроводом. Вращение фрезерной головки 10 обеспечивается гидроприводом 9. Поступательное движение фрезерной головки 10 для разработки и удаления грунта из-под трубопровода обеспечивается выдвиганием телескопического цилиндра 8. Установленные на фрезерной головке 10 резцы 11 обеспечивают эффективное разрушение разрабатываемого грунта, а шнек 12 – его удаление из зоны разработки (рисунок 2).

<sup>4</sup> Пат. № 2342494: МПК Е 20 F 5/10 : Система для выемки грунта из-под заглубленной трубы / Канда Тошимаса (JP), Мацуда Мицунори (JP). – 2002131907/03; заявл. 27.05.2004; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30.

<sup>5</sup> Пат. № 68538: МПК Е 02 F 3/28: Рабочее оборудование экскаватора / А.И. Демиденко, Н.А. Гончаров; СибАДИ. № 2007122960/22; заявл. 18.06.2007; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.

<sup>6</sup> Пат. № 182718: МПК Е 02 F 3/06 : Рабочее оборудование одноковшового экскаватора / А.И. Демиденко, И.С. Кузнецов; СибАДИ. – № 2018114359; заявл. 18.04.2018 ; опубл. 29.08.2018, Бюл. № 25.

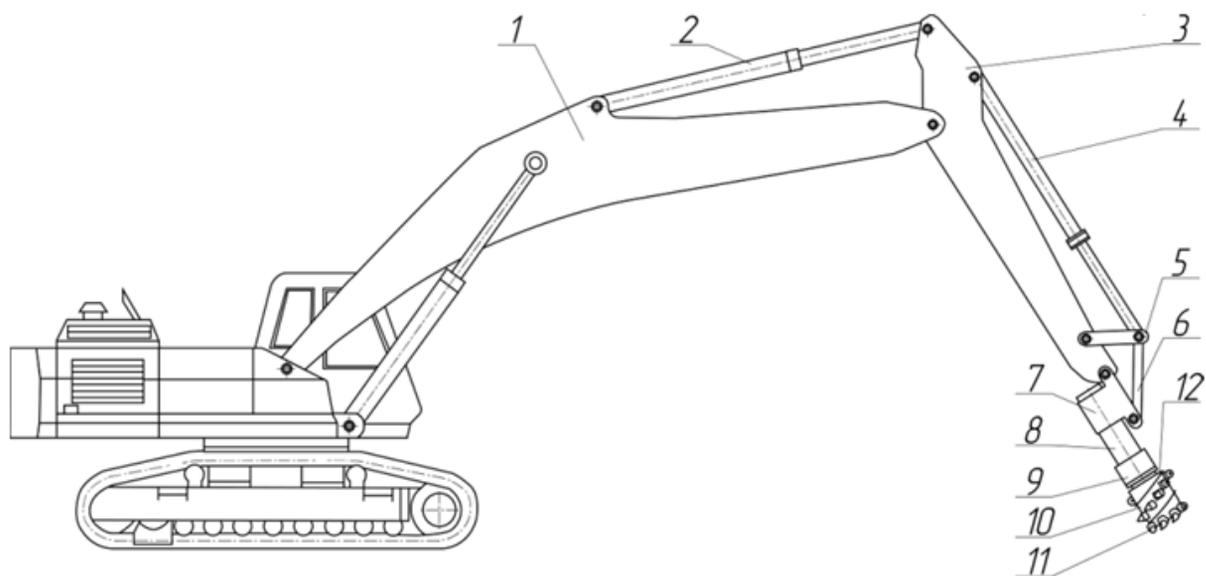


Рисунок 1 – Общий вид экскаватора с роторной фрезой

Figure 1 – General view of the excavator with a rotary cutter

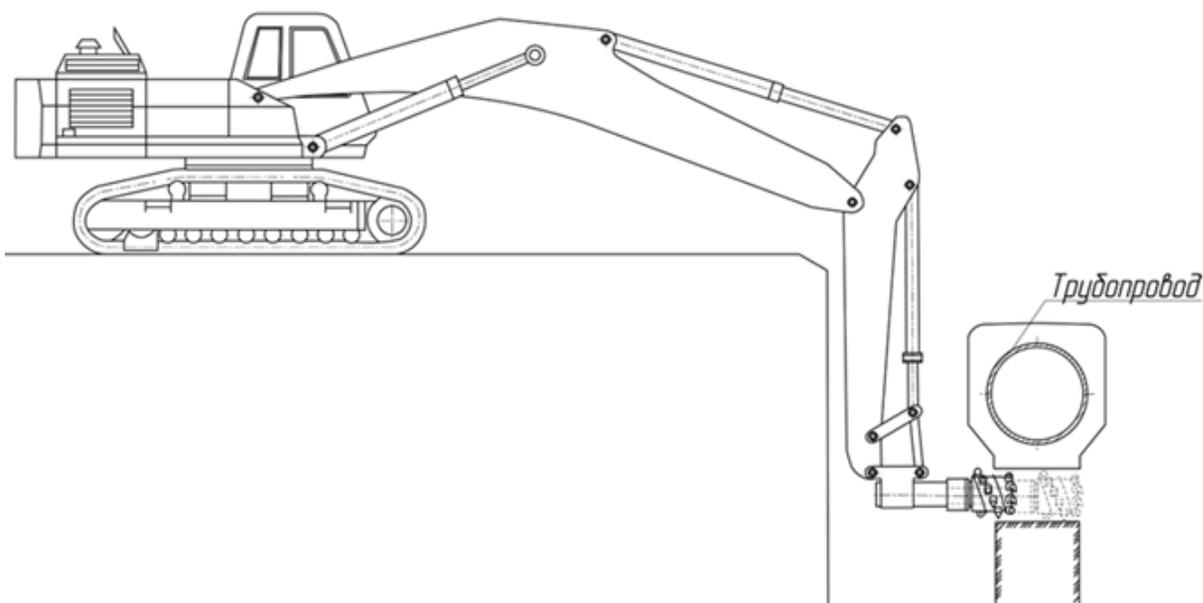


Рисунок 2 – Схема рабочего процесса подкола трубопровода

Figure 2 – Scheme of the pipeline digging process

На рисунке 3 показаны рабочие циклы процесса разработки грунта под магистральным трубопроводом, которые включают в себя:

1) опускание рабочего оборудования в траншею, предварительно разработанную одноковшовым экскаватором;

2) поворот роторной фрезы в рабочее положение (перпендикулярно вертикальной оси

трубопровода), а также регулировка датчиков глубины погружения и уклона крена;

3) разработка грунта под магистральным трубопроводом посредством вращательного движения роторной фрезы, а также возвратно-поступательного движения телескопической стрелы.

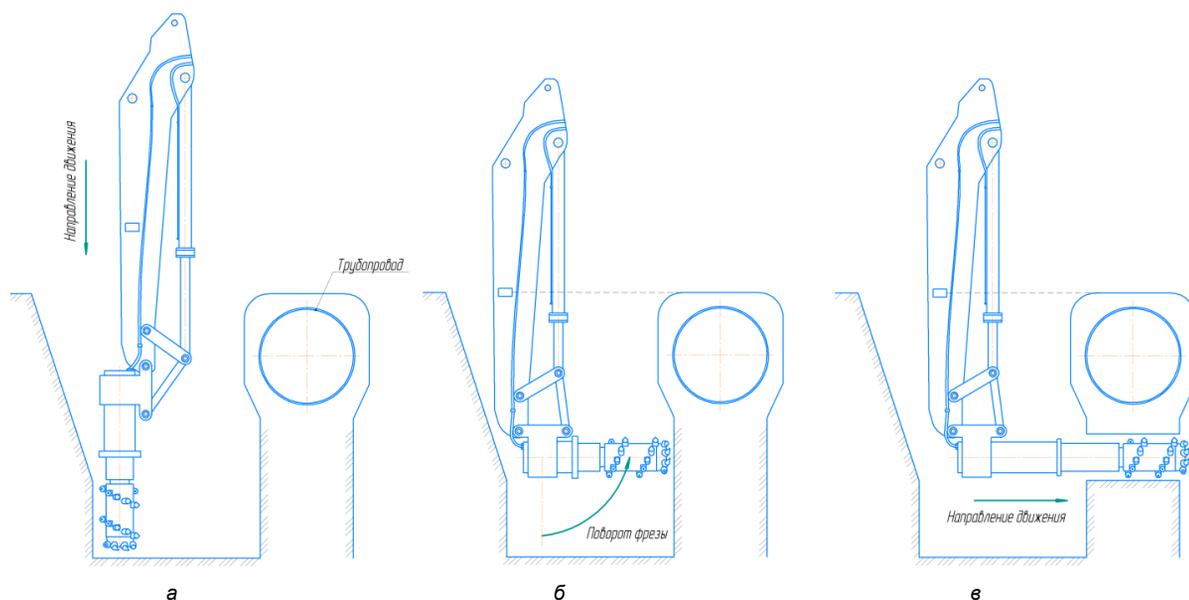


Рисунок 3 – Рабочие циклы процесса разработки грунта под магистральным трубопроводом: а – опускание рабочего органа в траншею; б – поворот рабочего органа в рабочее положение; в – разработка грунта под магистральным трубопроводом

Figure 3 – Operating cycles' excavation process by the main pipe: а – lowering the working body into the trench; б – rotation of the working body in the working position; в – excavation under the main pipeline

Предлагаемая конструкция роторного рабочего оборудования на базе одноковшового экскаватора, предназначенная для разработки грунта под магистральным трубопроводом, позволяет повысить безопасность, мобильность и производительность работ ремонтно-строительной колонны при капитальном ремонте магистрального трубопровода.

#### РАСЧЕТ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ

Одним из важнейших показателей эффективности рабочего процесса фрезы является энергоемкость процесса разрушения разрабатываемой среды, которая зависит от сопротивления резанию.

Мощность кругового резания разрабатываемой среды одним зубом, Вт, определяется из зависимости<sup>7</sup>

$$N_i = q \cdot d_3 \cdot S_{\text{стр.}i} \cdot R \cdot n_{\phi}, \quad (1)$$

где  $q$  – удельное сопротивление резанию,  $\text{кН/м}^2$  (для тяжелой глины  $q = 300\,000 \text{ Н/м}^2$ );  $d_3$  – диаметр основания зуба,  $d_3 = 0,03 \text{ м}$ ;  $S_{\text{стр.}i}$  – толщина стружки, срезаемой  $i$ -м зубом,  $\text{м}$ ;  $R$  – радиус фрезерного барабана,  $R = 0,19 \text{ м}$ ;  $n_{\phi}$  – частота вращения фрезерного барабана,  $\text{об/с}$ .

Тангенциальная составляющая силы резания определяется зависимостью, Н:

$$F_{ti} = \frac{N_i}{V_{\text{рез}}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{рез}}$  – скорость резания фрезы,  $\text{м/с}$ .

Сила сопротивления резанию разрабатываемой среды  $i$ -м зубом,  $\text{Н}$ , выражается зависимостью<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Галдин Н.С. Гидравлические схемы мобильных машин: учебное пособие / Н.С. Галдин, И.А. Семенова. Изд. 2-е, стер. Омск: СибАДИ, 2013. 203 с.

<sup>8</sup> Мороз С.А. Совершенствование механизма организации работ по техническому обслуживанию магистральных трубопроводов // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XVI Междунар. науч.-практ. конф. № 6(16). М., Изд. «МЦНО», 2018. С. 69–74.

$$F_{Pi} = \frac{q \cdot d_3 \cdot R \cdot V_n \cdot \frac{\alpha_i}{2\pi} \sin \alpha_i}{V_{рез}} \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол атаки зуба,  $\beta = 0,35$  рад;  $V_n$  – поступательная скорость машины,  $V_n = 0,05$  м/с;  $\alpha_i$  – угловая координата зуба, рад.

Полная сила сопротивления резанию имеет вид, Н:

$$F_p = m \cdot F_{Pi}, \quad (4)$$

где  $m$  – количество резцов фрезы, находящихся в контакте с грунтом.

Исходя из силового расчета определим параметры гидромотора<sup>9</sup> и мощность на валу гидромотора [22], Вт:

$$N_m = \frac{M_p \cdot \pi \cdot n_p}{30}, \quad (5)$$

где  $M_p$  – рабочий момент на исполнительном органе, Н·м;  $n_p$  – рабочая частота вращения, мин-1;

Частота вращения вала гидромотора, об/мин:

$$n_m = \frac{N_m \cdot n_n}{N_n}, \quad (6)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения гидромотора, мин-1;  $N_n$  – полезная мощность гидромотора, кВт.

Крутящий момент на валу гидромотора равен рабочему моменту на исполнительном органе, так как гидромотор имеет прямой привод.

Рабочий объем гидромотора рассчитывается по формуле

$$V_0 = \frac{Q_m \cdot 60 \cdot \eta_{o.m.}}{n_m \cdot 10^{-3}}, \quad (7)$$

где  $Q_m$  – расход рабочей жидкости, л/с;  $\eta_{o.m.}$  – объемный КПД гидромотора,  $\eta_{o.m.} = 0,92$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

По приведенным зависимостям (1) – (4) определены мощность кругового резания разрабатываемой среды одним зубом, тангенциальная составляющая силы резания, сила сопротивления резанию разрабатываемой среды  $i$ -м зубом и полная сила сопротивления резанию для различных типов грунтов. Результаты расчетов приведены в таблице 1 [23].

На основе полученных результатов расчета и таблицы 1 выбираем гидромотор<sup>10</sup>. МР 200 с максимальной мощностью 10 кВт, крутящим моментом 366 Н·м и расходом 60 л/мин [24, 25]. Это позволит производить работы фрезерным рабочим органом с любым типом грунта (см. таблицу 1).

Таблица 1  
Результаты расчетов

Table 1  
Calculation results

Тип грунта	$q, \text{H/M}^2$	$N_p, \text{Bm}$	$F_{ip}, \text{H}$	$F_{pr}, \text{H}$	$F_p, \text{H}$
Песок рыхлый	20000	0,56	11,2	6,66	66,6
Песок влажный	50000	1,4	28	16,66	166,6
Суглинок, средний и мелкий гравий, легкая глина	90000	2,53	50,6	30	300
Глина, плотный суглинок	160000	4,49	89,8	53,3	533
Тяжелая глина	300000	8,43	168,5	99,93	999,3

Результаты расчета, необходимых параметров гидромотора, сведены в таблицу 2.

Таблица 2  
Результаты расчета гидромотора

Table 2  
Hydraulic motor calculation results

Модель гидромотора	$N_m, \text{Bm}$	$n_m, \text{об/мин}$	$V_0, \text{см}^3$
МР 200	9158	275	200

<sup>9</sup> Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: учебное пособие / Н.С. Галдин. Изд. 2-е, стер. Омск : СибАДИ, 2010. 144 с.

<sup>10</sup> Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин : учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев. М. : Высшая школа, 1994. 432 с.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор и анализ конструкций обору- дований для разработки и удаления грунта из-под трубопровода, в том числе в сложных климатических условиях Севера России и Ар- ктики, в результате которого выявлены пробле- мы при эксплуатации машин и оборудования, отмечена высокая металлоемкость, опасность повреждения трубопровода и низкая эффек- тивность использования техники.

Предложено новое техническое решение конструкции оборудования с фрезерным ра- бочим органом на базе одноквешового экс- каватора, позволяющее усовершенствовать процесс выполнения земляных работ при ре- монте трубопровода.

Применение разработанного рабочего обо- рудования для подкопа позволит повысить производительность труда, снизить количе- ство машин, используемых в ремонтно-стро- ительной колонне, тем самым увеличив эф- фективность капиталовложений. Разработка защищена патентом на полезную модель РФ.

Разработана технология процесса подкопа и выемки грунта из-под магистрального трубо- провода, выполняемая с помощью представ- ленного рабочего оборудования.

Расчет энергоемкости процесса разруше- ния разрабатываемой среды экскаватором с фрезерным рабочим органом позволил опре- делить параметры его привода.

Направлениями дальнейших исследований является совершенствование такого вида обо- рудования путем его автоматизации и цифро- визации выполняемых технологических про- цессов с учетом физико-механических свойств разрабатываемых мерзлых грунтов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аладинский В.В., Малков А.Г., Ушаков А.В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефте- газ. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Hopkins, P. Pipelines: Past, Present, and Future / P. Hopkins // The 5th Asian Pacific IIV International Congress. Sydney, 2007. 27 p.
3. Bruce, W.-A. Advantages of Steel Sleeves over Composite Materials for Pipeline Repair / W.A. Bruce, W.E. Amend // Evaluation, Rehabilitation & Repair of Pipelines : conferences. Berlin, 2010. pp. 32–34.
4. Куркин А.С., Бровко В.В., Пономарев П.А. Особенности ремонтных конструкций и технологий их сварки при ремонте магистральных трубопро- водов без замены // Журнал нефтегазового строи- тельства. 2015. № 1. С. 40–43.
5. Мерициди И.И., Шотиди К.Х. Сравнитель- ный анализ методов ремонта подводных нефтепро- водов // Нефть, газ и бизнес. 2016. № 9. С. 8–12.
6. Archibald I.C. Soil stabilizer // Pipeline and gas Journal. 1984. № 11. pp. 44–46.
7. Большаков А.М., Сыромятникова А.С., Алексеев А.А. Непроектные положения газопро- водов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышлен- ность. 2014. №4. С. 66–69.
8. Ботвина Л.Р., Махутов Н.А., Пермьяков В.Н. Безопасность магистральных и технологических трубопроводов: влияние расслоений на их рабо- тоспособность // Нефть, газ и бизнес. 2002. №1. С. 41–46.
9. Боявленский В.И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и про- блемы освоения ресурсов углеводородов: моногра- фия. М.:ВЭО, 2014. 175 с.
10. Зорин Е.Е., Толстов А.Э., Ефимов В.М. На- пряженно-деформированное состояние трубопро- водов подземной прокладки в условиях криолито- зоны // Нефть, газ и бизнес. 2015. №9. С. 9–12.
11. Черняев К.В. Мониторинг технического со- стояния нефтепроводов // Трубопроводный транс- порт нефти. 2000. № 9. С. 14–17.
12. Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Динами- ка аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть» // Современные наукоемкие техно- логии. 2011. № 4. С. 64–67.
13. Hopkins, P. Pipelines: Past, Present, and Future/P. Hopkins // The 5th Asian Pacific IIV International Congress. Sydney, 2007. 27 p.
14. Набиев Р.Р. Обеспечение надёжности дли- тельно эксплуатируемых нефтепроводов // Трубо- проводный транспорт нефти. 2010. № 12. С. 9–11.
15. Душин В.А., Шаммазов, А.М. Капитальный ремонт линейной части магистральных нефтепро- водов: монография. Уфа, 2008. 272 с.
16. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // Applied Metallurgy and Corrosion Control . 2017. pp 269-347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1-9 269.
17. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. pp. 9-43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.
18. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015, Vol. 40, Iss. 11. pp. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.
19. Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Дина- мика аварий по причиненному ущербу на линей- ной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие техно- логии. 2011. № 4. С. 64–67.
20. Шарыгин Ю.М., Романцов С.В., Шарыгин А.М. Повышение прочности дефектных труб, уси-

ленных композитными муфтами с болтовым соединением // Транспорт и подземное хранение газа. 2002. № 3. С. 104–107.

21. Лукьянов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтных конструкций магистральных трубопроводов // Сварка и контроль. 2013. С. 181–188.

22. Емельянов Р.Т., Султанов Н.С., Закурдаев А.В., Скурихин Л.В. Моделирование динамики регулируемого гидромотора // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8. С. 181–185.

23. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017. № 1. pp. 82–83.

24. Hibbeler R.C. Fluid Mechanics. Part 2. Pearson Puntke Hall, 2015. 904 p.

25. Charru F. Hydrodynamic Instabilities. Cambridge University Press, 2011. 391 p.

## REFERENCES

1. Aladinskiy V.V., Malkov A.G., Ushakov A.B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method of gas pipeline repair using used pipes]. *Territoriya Neftegaz*. 2009; 8: 56–60 (in Russian).

2. Hopkins P. Pipelines: Past, Present, and Future // *The 5th Asian Pacific IIW International Congress. Sydney*. 2007: 27.

3. Bruce W.-A., Amend W.- E. Advantages of Steel Sleeves over Composite Materials for Pipeline Repair. *Evaluation, Rehabilitation & Repair of Pipelines: conferences*. Berlin. 2010: 32–34.

4. Kurkin A. S., Brovko V.V., Ponomarev P.A. Osobennosti remontnykh konstruktсий i tekhnologiy ikh svarki pri remonte magistral'nykh truboprovodov bez zameny [Features of repair structures and their welding technologies during repair of main pipelines without replacement]. *Zhurnal neftegazovogo stroitel'stva*. 2015; 1: 40–43 (in Russian).

5. Meritsidi I.I., Shotidi K.KH. Sravnitel'nyy analiz metodov remonta podvodnykh nefteprovodov [Comparative analysis of methods of repair of underwater oil pipelines]. *Neft', gaz i biznes*. 2016; 9: 8–12 (in Russian).

6. Archibald I.C. Soil stabilizer. *Pipeline and gas Journal*. 1984; 11: 44–46.

7. Bol'shakov A.M., Syromyatnikova A.S., Alekseyev A.A. Neproektnyye polozheniya gazoprovodov, prolozhennykh podzemnym sposobom v rayonakh mnogoletnemerzlykh gruntov [Non-project positions of underground gas pipelines in areas of long-term frozen soils]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2014; 4: 66–69 (in Russian).

8. Botvina L.R., Makhutov N.A., Permyakov V.N. Bezopasnost' magistral'nykh i tekhnologicheskikh truboprovodov: vliyaniye rassloenyiy na ikh rabotosposobnost' [Safety of main and process pipelines: effect of stratification on their operability]. *Neft', gaz i biznes*. 2002; 1: 41–46 (in Russian).

9. Bogoyavlenskiy V.I. *Arktika i Mirovoy okean: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy i problemy os-*

*voyeniya resursov uglevodorodov. Monografiya* [Arctic and oceans: current state, prospects and problems of hydrocarbon resources development. Monograph]. Moscow, VEO, 2014:11–175 (in Russian).

10. Zorin Ye.Ye., Tolstov A.E., Yefimov V.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye truboprovodov podzemnoy prokladki v usloviyakh kriolitozony [Stress-deformed condition of underground gasket pipelines in cryolitosone conditions]. *Neft', gaz i biznes*. 2015; 9: 9–12 (in Russian).

11. Chernyayev K.V. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nefteprovodov [Monitoring of the technical condition of oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2000; 9: 14–17 (in Russian).

12. Bulavintseva A.D., Mazurkin P.M. Dinamika avariј po prichinennomu ushherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO «AK «Transneft'» [Dynamics of accidents on the damage caused on the linear part of the main oil pipelines of JSC «AK Transneft'»]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2011; 4: 64–67 (in Russian).

13. Hopkins P. Pipelines: Past, Present, and Future. *The 5th Asian Pacific IIW International Congress. Sydney*, 2007: 27.

14. Nabiyeв R.R. Obespecheniye nadozhnosti dlitel'no ekspluatiruyemykh nefteprovodov [Ensuring reliability of long-term operated oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2010; 12: 9–11 (in Russian).

15. Dushin V.A.; Shammazov, A.M. *Kapital'nyy remont lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov: monografiya* [Major repair of line part of main oil pipelines: monograph]. Ufa 2008: 272 (in Russian).

16. Amiya K.L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry. *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. 2017: 269-347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1-9 269.

17. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects. *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016: 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.

18. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015; 40, Iss. 11: 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.

19. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avariј po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft'» [Dynamics of accidents on the damage caused on the linear part of the main oil pipelines of JSC Transneft']. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2011; 4: 64–67 (in Russian).

20. Sharygin YU. M., Romantsov S. V., Sharygin A. M. Povysheniye prochnosti defektnykh trub, usilennykh kompozitnymi muftami s boltovym soyedineniyem [Increased strength of defective pipes reinforced by composite couplings with bolted connection]. *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*. 2002; 3:104–107 (in Russian).

21. Luk'yanov A. A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya remontnykh konstruktсий

magistral'nykh truboprovodov [Analysis of stress-strain state of repair structures of main pipelines]. *Svarka i kontrol'*. 2013; 181–188 (in Russian).

22. Yemel'yanov R.T., Sultanov N.S., Zakurdayev A.V., Skurikhin L.V. Modelirovaniye dinamiki reguliruyemogo gidromotora [Simulation of controlled hydraulic motor dynamics] *Vestnik KrasGAU*. 2014; 8: 181–185 (in Russian).

23. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017; 1: 82–83.

24. Hibbeler R.C. Fluid Mechanics. Part 2. Pearson Puntke Hall, 2015; 904.

25. Charru F. Hydrodynamic Instabilities. Cambridge University Press, 2011; 391.

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Демиденко Анатолий Иванович – Формулировка направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования.*

*Кузнецов Илья Сергеевич – Анализ состояния вопроса и результатов исследования. Выполнение расчетов и чертежей. Оформление статьи.*

### AUTHORS' CONTRIBUTION

*Anatoly I. Demidenko – formulation of the direction and research topic; leading the process of the research; choice of methodology and research methods.*

*Ilya S. Kuznetsov – analysis of the status of the issue and the results of the research; performing calculations and drawings; design of the paper.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Демиденко Анатолий Иванович – канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5. e-mail: demidenko\_ai@sibadi.org).*

*Кузнецов Илья Сергеевич – студент факультета «Нефтегазовая и строительная техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Anatoly I. Demidenko – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Machines for the Construction and Maintenance of Oil and Gas Complexes and Infrastructures, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: demidenko\_ai@sibadi.org).*

*Ilya S. Kuznetsov – Student of the Faculty of Oil and Gas and Construction Equipment, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).*

УДК 658.5.12

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОГИДРОЦИЛИНДРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**А.Е. Карамгужинова<sup>1</sup>, В.Н. Кузнецова<sup>2</sup>, В.В. Савинкин<sup>1</sup>, Д.А. Коптяев<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,  
г. Петропавловск, Казахстан;  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ»,  
г. Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблема повышения эффективности силовых машин ставит первостепенной задачей разработку новой конструкции основных элементов или привода с возможностью широкого применения гибридных приводов. Для сохранения мощностных характеристик привода и его технико-эксплуатационных показателей как альтернатива рассмотрен гибридный с имеющимися электрическими и гидравлическими приводными частями, которые формируют сложный синергетический механизм. Предложенная комбинированная следящая система с указанными параметрами позволяет обеспечить эффективное функционирование привода многих машин.

**Методика исследования.** В статье представлены результаты аналитического исследования, перспективы развития мехатронных систем в технике и технологических комплексах. Определена отраслевая область с высоким потенциалом развития мехатронных и гибридных приводов.

Сформулирована проблема проектирования и развития гибридных приводов, связанная с тем, что отсутствует единый метод обоснования показателей энергоэффективности силового гибридного привода, который обеспечивал бы взаимодействие двух разнородных систем (электропривода и гидропривода с принципиально разными параметрами).

**Результаты.** Проведен анализ конструкционных, технологических и эксплуатационных параметров систем гибридного привода. Предложена комбинированная следящая система привода.

**Заключение.** Доказаны и обоснованы обширные возможности применения гибридных приводов как альтернатива пневмо- и гидроприводов. Анализ результатов проведенных исследований позволит конкретизировать направления и перспективы применения гибридных синергетических приводов и систем для функционирования рабочего оборудования, машин и комплексов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мехатронная система, электроцилиндр, гидроцилиндр, эффективность, силовая машина.

Поступила 26.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.

Для цитирования: Карамгужинова А.Е., Кузнецова В.Н., Савинкин В.В., Коптяев Д.А. Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электрогидроцилиндра повышенной эффективности. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1):22-31. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

© Карамгужинова А.Е., Кузнецова В.Н., Савинкин В.В., Коптяев Д.А.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

## ELECTROHYDROCYLINDER OF INCREASED EFFICIENCY: PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MECHATRONIC SYSTEMS

Aigul E. Karamguzhinova<sup>1</sup>, Victoria N. Kuznetsova<sup>2</sup>, Vitaliy V. Savinkin<sup>1</sup>, Dmitriy A. Koptyaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev, Petropavlovsk, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of increasing the efficiency of power machines is important to develop a new design of the main elements or drive with the possibility of widespread use of hybrid drives. To preserve the power characteristics of the drive and its technical and operational indicators, the authors consider a hybrid with the available electric and hydraulic drive parts that form a complex synergistic mechanism as an alternative. The proposed combined tracking system with the specified parameters allows for the efficient operation of the drive of many machines.

**Materials and methods.** The paper presented the results of an analytical study, the prospects for the development of mechatronic systems in engineering and technological complexes. The research also identified the industry area with a high development potential for mechatronic and hybrid drives.

The authors formulated the problem of designing and developing hybrid drives due to the fact that there was no single method for substantiating the energy efficiency indicators of a power hybrid drive that ensured the interaction of two dissimilar systems (electric drive and hydraulic drive with fundamentally different parameters).

**Results.** Therefore, the authors conducted the analysis of the structural, technological and operational parameters of the hybrid drive systems and proposed a combined servo drive system.

**Discussion and conclusions.** The authors prove and justify the extensive possibilities of using hybrid drives as an alternative to pneumatic and hydraulic drives. The results of the research allow specifying the directions and prospects of using hybrid synergetic drives and systems for the functioning of working equipment, machines and complexes.

**KEYWORDS:** mechatronic system, electric cylinder, hydraulic cylinder, efficiency, power machine.

Submitted 26.01.2020, revised 21.02.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

*For citation:* Karamguzhinova A.E., Kuznetsova V.N., Savinkin V.V., Koptyaev D.A. Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):22-31. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

© Karamguzhinova A. E., Kuznetsova V. N., Savinkin V. V., Koptyaev D. A.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире машиностроение представляет ведущую отрасль экономики страны. Именно его развитие отражает уровень научно-технического потенциала и оборотоспособности страны. Машиностроение определяет перспективы мировой индустрии в целом.

Сложное оборудование и высокопроизводительные комплексы станкостроения, дорожно-строительного и транспортного машиностроения основано на применении гидромеханизмов, зарекомендовавших себя в течение многих десятилетий развивающейся отрасли. Сложные машины общего и специального назначения насыщены гидравлическими системами и агрегатами, которые по их назначению и выполняемым функциям принято подразделять на две основные группы: системы и агрегаты, предназначенные для передачи механической энергии от источника к рабочим органам машины и управления движением этих органов; системы и агрегаты, предназначенные для перемещения различных жидкостей из мест хранения к местам ее потребления [1, 2, 3, 4].

Но применение гидравлики, несмотря на широкий спектр достоинств, сопряжено с множеством сложностей, связанных с чистотой масла, безотказной работой насосов, силовых машин и фильтров, профессионализмом и своевременностью обслуживания, не говоря о необходимости нести весьма существенные дополнительные расходы, связанные с регламентными работами.

В производственной практике широкий функционал машиностроительного, дорожно-строительного и энергетического оборудования требует высокой точности позиционирования подвижных элементов и агрегатов, при этом сохраняя высокие мощностные и силовые характеристики машин. В настоящее время данная техническая задача решается применением гидравлических приводов. Однако сложность и громоздкость оборудования имеет существенные недостатки: негерметичность сопряжений, сложность в диагностике и ремонте, нестабильность динамических характеристик и высокая стоимость обслуживания. При эксплуатации данных систем зачастую не обеспечивается точность координатного пози-

ционирования элементов и усложнена автоматизация процессов диагностики на удаленном доступе. Имеется опыт энергетических предприятий по эксплуатации электроприводов, обеспечивающих точность позиционирования элементов, однако при этом возникает необходимость в высоких пусковых токах и невозможность создания больших сил и давлений для восприятия внешних нагрузок [5, 6]. Решить данную проблему предлагается внедрением гибридных приводов, обеспечивающих эффективную работу силовых агрегатов с возможностью гашения пиково-динамических нагрузок [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Современные технологии позволяют разрабатывать электромеханические и электрогидравлические приводы, концепция которых будет построена на системном подходе к функциональным задачам силовых машин<sup>1</sup> [16, 17].

Развитие гибридных приводов связано с необходимостью снижения расхода энергии, топлива, материалов и ужесточением экологических норм на эмиссию материалозатрат. Наибольшие успехи достигнуты в области автотранспортных средств, в дорожно-строительной технике и машиностроении. Гибридные приводы (ГП) пока распространены в меньшей степени, что связано с тяжелыми условиями эксплуатации дорожно-строительной техники, в том числе с необходимостью реализации больших тяговых усилий. Их устанавливают, как правило, на машины циклического действия, в частности, на фронтальные одноковшовые погрузчики, одноковшовые экскаваторы и бульдозеры, а также на погрузчики и краны. Однако, не смотря на низкий уровень применения ГП, наблюдаются существенные перспективы их развития и широкий функционал применения в различных сферах машиностроения. Одними из наиболее перспективных областей применения электромеханических систем являются гидроэнергетика, добывающая промышленность и дорожное строительство, требующие надежной работы, высокой точности позиционирования и быстродействия машин и комплексов<sup>2</sup> [18].

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На основе проведенного анализа практического использования ГП, выдвинуто предполо-

<sup>1</sup> Хайманн Б., Герт В., Попп К., Репецкий О. Мехатроника: Компоненты, методы, примеры. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 2010. 602 с.

<sup>2</sup> Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. Ростов н/Д : Феникс. 2006. 320 с.

жение, что использование в качестве привода исполнительных механизмов электрогидроцилиндров с роликово-винтовыми передачами (РВП), в том числе и дублированных, позволяет существенно улучшить динамику рабочих органов и их управление, а значит и энергоэффективность самого агрегата или комплекса. Кроме того, использование электрогидроцилиндров позволяет непосредственно контролировать положение и динамику поворота оборудования, сохраняя тяговые мощности и высокие силовые характеристики. Для самых крупных гидроагрегатов использование электрогидроцилиндров в качестве приводов позволит существенно снизить требования к качеству масла для гидрораспределителей и побудительных золотников, что приведет к существенному снижению ежегодных затрат на обслуживание и повышению надежности систем.

#### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Повышение эффективности силовых машин, как правило, связано с разработкой но-

вых конструкций основных элементов или привода. Конструктивные элементы должны быть модернизированы таким образом, чтобы их основной функционал не был нарушен и КПД сохранился на прежнем уровне. Кроме того, усовершенствованная конструкция должна иметь повышенные характеристики тех параметров, которые являются общепринятыми в нормативных документах. Только в этом случае повышается вероятность долгосрочной перспективы эксплуатации данного устройства. Также одной из основных задач при модернизации прототипа силового привода является обоснование критериев энергоэффективности. Задача усложняется, когда при модернизации конструкции планируется обеспечить взаимодействие двух разных систем: электропривода и гидропривода (рисунок 1). Сложность связана с тем, что показатели энергоэффективности данных систем могут носить принципиально разные параметры и поэтому необходимо исследовать их функциональные зависимости конструкционных, технологических и эксплуатационных параметров [19, 20].

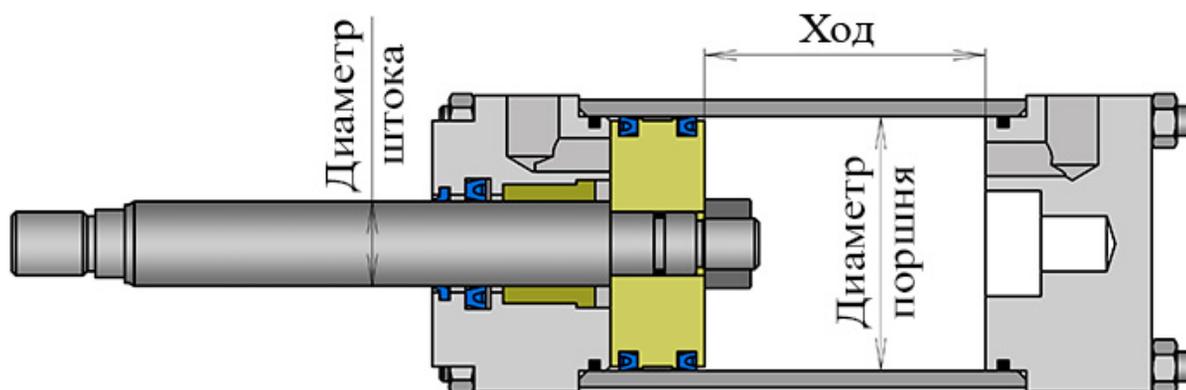


Рисунок 1 – Вид классического гидроцилиндра двухстороннего действия

Figure 1 – View of a classic double-acting hydraulic cylinder

Рассмотрим основные технические характеристики двух типов привода: гидравлический

(см. рисунок 1) и электрический (рисунок 2), цилиндры (таблицы 1 и 2).

Таблица 1  
Основные технические характеристики гидроцилиндра ЦГ1-80.56Х900.11-УХЛ

Table 1  
Main technical characteristics of the hydraulic cylinder TsG1-80.56X900.11-UHL

Конструктивные		Технологические		Эксплуатационные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Диаметр поршня, $d_p$ , мм	80	Толкающее усилие, $F_p$ , кН	80,38	Номинальное давление, $P_n$ , МПа	16
Диаметр штока, $d_{ш}$ , мм	56	Тянущее усилие, $F_{тн}$ , кН	40,99	Рабочее давление, $P_{раб}$ , МПа	16
Ход поршня, $h$	900	Полный ход цилиндра, $L$ , мм	900	Предельное давление, $P_{max}$ , МПа	20
Расстояние по центрам, $l_c$ , мм	1265	-	-	Скорость перемещения штока, $V_p$ , м/с	0,1063
Масса, $m$ , кг	53 кг	-	-	Расход жидкости, $Q$ , л/мин	32

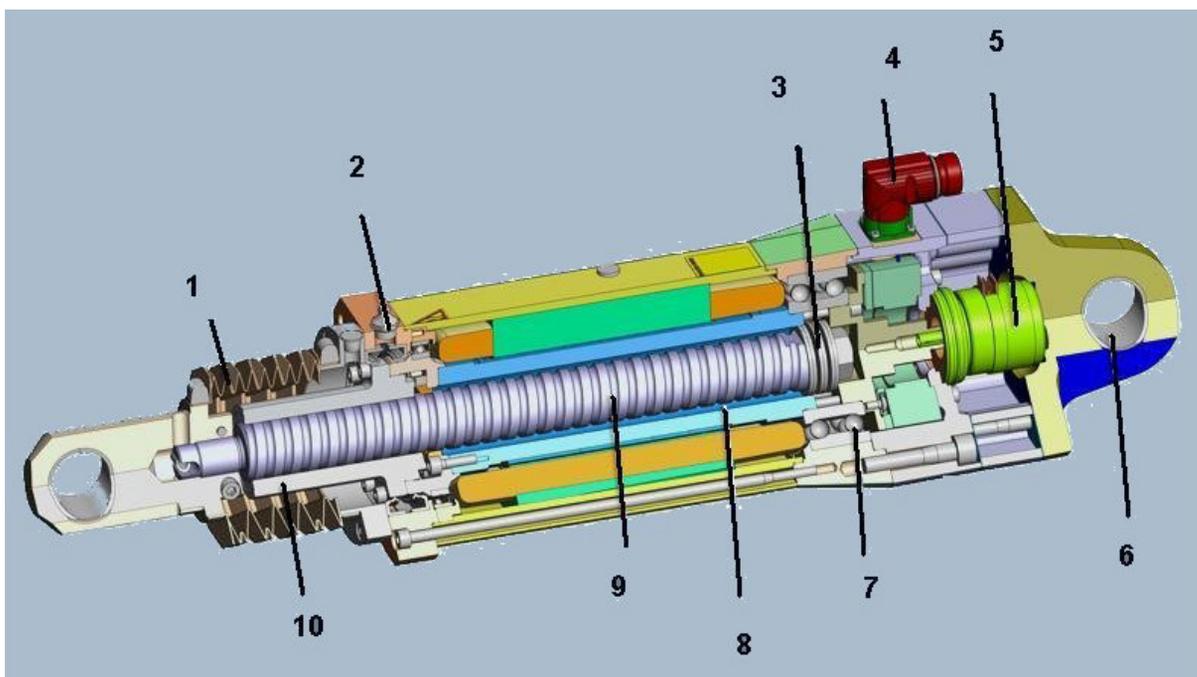


Рисунок 2 – Вид электроцилиндра:  
1 – шток, 2 – датчик контроля, 3 – червячная втулка, 4 – коммутатор проводной,  
5 – электромотор, 6 – монтажный кронштейн, 7 – опорный подшипник,  
8 – статор электромагнита, 9 – винтовой шток, 10 – направляющая втулка

Figure 2 – View of the electric cylinder:  
1 – rod, 2 – control sensor, 3 – worm sleeve, 4 – wired switch,  
5 – electric motor, 6 – mounting bracket, 7 – pillow block bearing,  
8 – electromagnet stator, 9 – screw rod, 10 – guide sleeve

Таблица 2  
Основные технические характеристики электроцилиндра

Table 2  
Main technical characteristics of the electric cylinder

Конструктивные		Технологические		Эксплуатационные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Длина штока, I, мм	до 455	Максимальная сила, кН	до 55 кН	Ход (min – max), S, мм	100 ÷ 1200
Диаметр винта, дв, мм	12	Степень защиты	IP65/67	Максимальный вращающий момент, M, Нм	2,50
Шаг винта, Pв	5	-	-	Максимальная линейная скорость, V <sub>л</sub> , мм/с	0,56
Динамическая грузоподъемность, С	6600	-	-	Максимальное ускорение, а, м/с <sup>2</sup>	25
-	-	-	-	Скорость выхода штока, V <sub>ш</sub> , мм/с	до 1000
-	-	-	-	Точность позиционирования, мкм	до 2,5
-	-	-	-	Усилие, F, кН	до 180
-	-	-	-	Угловая скорость вращения, ω, рад/с <sup>-1</sup>	312

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя технические характеристики двух систем привода, установлено, что не все параметры могут выступать показателями эффективности работы привода. Например, один из важных показателей гидроцилиндра – номинальное давление, P<sub>н</sub> – не всегда влияет на фактический расход рабочей жидкости, Q, поскольку при постоянном давлении расход жидкости в процессе эксплуатации изменяет свои значения. Причиной могут быть различные факторы, которые не учтены ранее: износ контактных поверхностей, i, вязкость жидкости, степень вспенивания и т.д. Значит, эффективность работы гидроцилиндра оценить нормативным показателем P<sub>н</sub> нельзя и тем более невозможно даже косвенно оценить энергоэффективность гидроцилиндра. Таким образом, параметром энергоэффективности должен выступать обобщенный показатель, характеризующий зависимость эксплуатационных и технологических параметров, которые предстоит установить. В основе конструкции электроцилиндров заложен ряд технических решений из механики и электротехники (рисунок 3).



Рисунок 3 – Электросервопривод

Figure 3 – Electric actuator

Особенность конструкции машин с электрическим приводом заключается в сложности физических явлений электрических полей, которые формируют основной функционал приводной или силовой машины. Структура таких механизмов должна обеспечивать надежную и синхронную работу всех его систем.

Сложность синхронизации подвижных элементов заключается в выравнивании временного интервала  $t$  на разных режимах управления:  $t_1$  – время разгона,  $t_2$  – время установившегося движения и  $t_3$  – время торможения. Для реализации указанной технической задачи одна часть устройства представляет собой синхронный сервомотор с установленными в нём постоянными магнитами и интегрированными датчиками обратной связи; другая часть – инвертированную роликово-винтовую передачу (ИРВП). Статор электромотора представляет собой ламинированные сегменты с обмоткой, что в значительной степени повышает крутящий момент. Электромагнитное поле, которое генерируется обмотками статора, приводит во вращение ротор сервомотора. ИРВП преобразует вращательное движение ротора в поступательное движение штока. Вращающийся под действием электромагнитного поля ротор представляет собой полый металлический цилиндр с нарезанной внутри него ходовой резьбой. Внутри цилиндра по резьбе линейно перемещается механизм с большим количеством опорных роликов. Наличие подвижного узла, имеющего сферические тела качения, не всегда эффективно сказывается на процессе эксплуатации [21, 22].

Линейные сервомоторы могут развивать скорость до 1,5 м/с, усилие до 180 кН и обеспечивать ход штока в пределах до 1,2 м, точность позиционирования – единицы микрометров. Электромеханические линейные моторы отличаются своей миниатюрностью. Управление и задачи позиционирования для электромеханических систем решаются достаточно просто, так как требуются стандартные сер-

воусилители, которые имеют невысокую стоимость. Программирование профиля движения и настройку сервоусилителя осуществить достаточно просто.

Следовательно, необходимо решить научно-техническую задачу по разработке гибридного силового привода точного позиционирования и обосновать адекватные критерии энергоэффективности. Например, в момент разгона и торможения происходит проскальзывание тел качения или их кратковременное подклинивание. Более низкий КПД и максимальная скорость у шарико-винтовой пары (ШВП) обусловлена следующими факторами: чем больше скорость, тем больше трение и износ шариков, что уменьшает КПД (рисунок 4). На внешней оболочке поверхности цилиндра (ротора) установлены и надёжно зафиксированы несколько рядов постоянных магнитов. Количество магнитов является определяющим фактором для расчёта создаваемого крутящего момента и усилия, необходимого для линейного перемещения.

При скорости вала более 1000 об/мин возникают сильные соударения и вибрации шариков, поэтому все, даже самые точные и дорогие ШВП, не рассчитаны на скорости свыше 2000 об/мин.

Конструкция РВП изначально лишена подобных недостатков. Все ролики жестко закреплены друг относительно друга и не могут соприкоснуться. Для механической синхронизации вращения каждого ролика применены специальные зубчики на конце роликов (рисунок 5), что позволяет избежать ненужных проскальзываний [23].

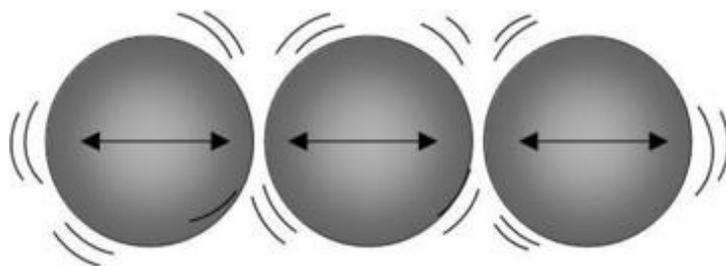


Рисунок 4 – Тела качения

Figure 4 – Rolling bodies

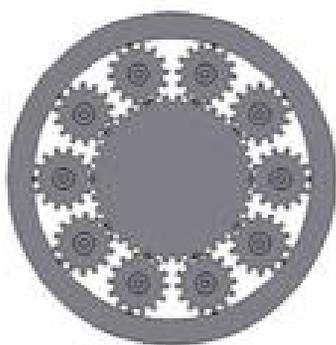


Рисунок 5 – Ролико-винтовая пара электропривода

Figure 5 – Roller-screw pair of the electric drive

При наличии подобных систем и подвижных элементов достигаются следующие технические характеристики: максимальные усилия до 6 кН; при длине штока до  $l = 455$  мм скорость – до 550 мм/с. Для приведения в действие необходим источник питания постоянно-го тока с напряжением  $24 \div 48$  В.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сделан вывод о возможности широкого применения гибридных приводов на основе электрических и гидравлических приводных частей, которые формируют сложный синергетический механизм. Предложенная комбинированная следящая система с указанными параметрами позволяет обеспечить эффективное функционирование привода многих машин. Представленная система с электрическим или гибридным приводом может быть эффективно использована для замены пневматических и гидравлических приводов в высокотоннажных машинах для регулирования расхода различных сред и обеспечения точности позиционирования рабочего оборудования. Диапазон подобных решений достаточно широк: энергетические турбины, системы управления сложными механизмами горнодобывающих и дорожно-строительных комплексов. Особенно эффективно применение данных систем для сложно-нагруженных режимов прецизионных пар, регулирующих скоростные характеристики узлов и сложных механизмов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Величко С.А., Чумаков П.В., Коломейченко А.В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 3. С. 396–413.

2. Величко С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В. Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 4. С. 36–41.

3. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders // 13th International Conference on Tribology. 2017. Vol. 174. pp. 79–86.

4. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters // System. Method. Tehnologii. 2009. No 3. pp. 19–23.

5. Velichko S.A. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, No 2. pp. 116–123.

6. Zhang X., Wang G., Xia P., Li H.P., He M. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring. Advances in Mechanical Engineering. 2016. No 10, pp. 1–9.

7. Vorlauffer G., Ilincic S., Franek F. and Pauschitz A. Quantification of wear by comparison of surface topography data. Encyclopedia of tribology. New York :Springer Verlag, 2012. Ch. 967.

8. Allmaier H., Sander D.E., Reich F.M. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems // World Tribology Congress. Torino. 2013. P. 117.

9. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Анализ эффективности работы одноковшового экскаватора // Вестник СибАДИ. 2014. № 6 (40). С. 26–33.

10. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface // Control Engineering Practice. 2002. T. 10. № 7. pp. 697–711.

11. Heipl O and Murrenhoff H. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. Tribol Int 2015. 85. pp. 66–73.

12. Lang PS, Paluszny A and Zimmerman RW. Hydraulic sealing due to pressure solution contact zone growth in siliciclastic rock fractures. J Geophys Res: Sol Ea 2015. 120. pp. 4080–4101.

13. Mirza J. Joint seals for hydraulic structures in severe climates. J Civ Eng Manag 2014. 20. pp. 38–46.

14. Zhang F-Y and Li T. Initial modeling of Y-ring based on ANSYS. J Tianjin Polytech Univ 2013. 32. pp. 85–88.

15. Li S-H, Jia H-M, Li M-D. Theory and testing method of hyperelastic material constitutive model. China Elastom 2011. 21. pp. 58–64.

16. Сторожев В.В., Феоктистов Н.А. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования: монография. М.: ИТК «Дашков и К». 2015. 412 с.

17. Лепешкин А.В. Гидравлика, гидропневмопривод: монография. М.: ГОУ МГИУ. 2007. 350 с.

18. Региня В.В. Гидромеханические передачи карьерных самосвалов БелАЗ с мехатронной системой управления: диагностирование технического состояния в процессе тестовых испытаний // Горная промышленность. 2017. №3 (133) С. 32–36.

19. Карпович С.Е. Мехатронные системы параллельной кинематики на гибридных приводах прямого действия // Доклады БГУИР. 2019. № 2 (120). С. 59–72.

20. Озерский А.И., Шошиашвили М.Э. Метод расчёта динамических режимов работы электрогидропривода с ампулированной гидравлической системой // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 52–60.

21. Исаев Ю.М., Матросов А.В., Машков М.А., Сунарчин Р.А. Расчётно-экспериментальное исследование многомашинного электрогидравлического следящего привода // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Том 23. № 3. 2017. С. 136–143.

22. Скосарева Е.С., Колюбин С.А. Управление движением мехатронной системы с гибким вращательным звеном: теория и эксперимент // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Том 18. № 5. С. 780–786.

23. Тарасик В.П., Горбатенко Н.Н., Плякин Р.В., Савицкий В.С. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей мобильных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 2(47). С. 68–80.

## REFERENCES

1. Velichko S.A, Chumakov P.V., Kolomejchenko A.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh gidrocilindrov serii S navesnykh gidrosistem traktorov [Evaluation of technical condition of power hydraulic cylinders of series C of tractor hinged hydraulic systems]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2019; 29. № 3: 396–413 (in Russian).

2. Velichko S. A, Senin P. V., Chumakov P. V. Puti povysheniya mezhremontnogo resursa silovykh gidrocilindrov [Ways to increase inter-repair life of power hydraulic cylinders]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*. 2015; 4: 36–41 (in Russian).

3. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders. *13th International Conference on Tribology*. 2017; 174: 79–86.

4. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters. *Systemi. Methodi. Tehnologii*. 2009; 3: 19–23.

5. Velichko S. A. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53, no. 2: 116–123.

6. Zhang X., Wang G., Xia P., Li H.P., He M. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 10: 1–9.

7. Vorlauffer G., Ilincic S., Franek F. and Pauschitz A. Quantification of wear by comparison of surface topography data. *Encyclopedia of tribology*. New York: Springer Verlag. 2012. Ch; 967.

8. Allmaier H., Sander D.E., Reich F.M. Mea-

suring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems. *World Tribology Congress*. Torino. 2013: 117.

9. Kuznecova V.N., Savinkin V.V. Analiz effektivnosti raboty odnokovshovogo ekskavatora. [Analysis of single-bucket excavator operation efficiency]. *Vestnik SibADI*. 2014; 6 (40): 26–33 (in Russian).

10. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface. *Control Engineering Practice*. 2002; 10. № 7: 697–711.

11. Heipl O and Murrenhoff H. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. *Tribol Int*. 2015; 85: 66–73.

12. Lang P.S., Paluszny A and Zimmerman R.W. Hydraulic sealing due to pressure solution contact zone growth in siliciclastic rock fractures. *J Geophys Res: Sol Ea* 2015; 120: 4080–4101.

13. Mirza J. Joint seals for hydraulic structures in severe climates. *J Civ Eng Manag*. 2014; 20: 38–46.

14. Zhang F-Y and Li T. Initial modeling of Y-ring based on ANSYS. *J Tianjin Polytech Univ*. 2013; 32: 85–88.

15. Li S-H, Jia H-M, Li M-D. Theory and testing method of hyperelastic material constitutive model. *China Elastom* 2011; 21: 58–64.

16. Storozhev V.V., Feoktistov N.A. Sistemotekhnika i mekhatronika tekhnologicheskikh mashin i oborudovaniya: monografiya [Systems engineering and mechatronics of process machines and equipment: monograph]. Moscow, ITK Dashkov i K. 2015: 412 (in Russian).

17. Lepeshkin A.V. Gidravlika gidropnevmoprivod [Hydraulics, hydropneumatic actuator: monograph]. Moscow, GOU MGIU, 2007: 350 (in Russian).

18. Reginya V.V. Gidromekhanicheskie peredachi kar'ernykh samosvalov BelAZ s mekhatronnoj sistemoy upravleniya: diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya v processe testovykh ispytaniy [Hydromechanical transmissions of mine dump trucks BelAZ with mechatron control system: diagnosis of technical condition during test tests]. *Gornaya Promyshlennost'* 2017; 3 (133): 32–36 (in Russian).

19. Karpovich S.E. Mekhatronnye sistemy parallel'noy kinematiki na gibridnykh privodakh pryamogo dejstviya [Mechatronic parallel kinematics systems on direct-acting hybrid drives]. *Doklady BGUIR*. 2019; 2 (120): 59–72 (in Russian).

20. Ozerskij A.I., Shoshiashvili M.E. Metod raschyota dinamicheskikh rezhimov raboty elektrogidroprivoda s ampulirovannoy gidravlicheskoj sistemoy [Method of calculation of dynamic operating modes of electric hydraulic drive with ampulized hydraulic system]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2014; 1: 52–60 (in Russian).

21. Isaev Y.M., Matrosov A.V., Mashkov M.A., Sunarchin R.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie mnogomashinnogo elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda [Design and experimental study of multi-machine electrohydraulic servo drive]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti CPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2017; 23. no. 3. 2017: 136–143 (in Russian).

22. Skosareva E.S., Kolyubin S.A. Upravlenie dvizheniem mekhatronnoj sistemy s gibkim vrashchatel'nym zvenom: teoriya i eksperiment [Mechatronic motion control with flexible rotary link: theory and experiment]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2018; 18. No 5: 780–786 (in Russian).

23. Tarasik V.P., Gorbatenko N.N., Plyakin R.V., Savickij V.S. Mekhatronnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gidromekhanicheskoj peredachej mobil'nyh mashin [Mechatronic system of automatic control of hydromechanical transmission of mobile machines]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2015; 2(47): 68–80 (in Russian).

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Карамгужинова Айгуль Еркеновна – Формирование направления исследования, обзор результатов предшествующих исследований по эксплуатации гидроцилиндров (25%).*

*Кузнецова Виктория Николаевна – Формирование матрицы сравнения технических характеристик гидроцилиндра и электроцилиндра. Установление критических позиций для параметризации критериев эффективности функционирования (25%).*

*Савинкин Савинкин Виталий Владимирович – Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения алгоритма аналитических исследований, анализ конструктивно-технологических особенностей электроцилиндра (25%).*

*Коптяев Дмитрий Александрович – Аналитический свод результатов, анализ эффективности отдельных элементов электроцилиндра и гидроцилиндра, анализ возможности совмещения двух принципиально разных систем, формирование выводов (25%).*

### AUTHORS' CONTRIBUTION

*Aigul E. Karamguzhinova formation of the research direction; review of the results on the operation of hydraulic cylinders by previous researchers (25%).*

*Victoria N. Kuznetsova formation of a matrix comparing the technical characteristics of the hydraulic cylinder and the electric cylinder; establishing of the critical positions for the performance criterion parameters (25%).*

*Vitaliy V. Savinkin formulation of research problems; formulation of research tasks; designation of analytical research algorithm; analysis of structural and technological features of the electric cylinder (25%).*

*Dmitriy A. Koptyaev analytical summary of the results; analysis of the effectiveness of individual elements of the electric and hydraulic cylinder; analysis of the possibility of combining two fundamentally different systems; conclusions (25%).*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Карамгужинова Айгуль Еркеновна (г. Петропавловск, Казахстан) – старший преподаватель кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: vip.lady.sadvakasova@mail.ru).*

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

*Савинкин Виталий Владимирович (г. Петропавловск, Казахстан) – д-р техн. наук, Scopus Author ID 57195726895, доц. кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: cavinkin7@mail.ru).*

*Коптяев Дмитрий Александрович (г. Петропавловск, Казахстан) – старший преподаватель кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: koptyev29@mail.ru).*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Aigul E. Karamguzhinova (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Senior Lecturer of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: vip.lady.sadvakasova@mail.ru).*

*Victoria N. Kuznetsova (Omsk, Russia) – Dr of Sci. (Engineering), Professor, Scopus Author ID 8671569200, Professor of the Department of the Operation and Service of Transport and Technological Machines and Systems in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Russia, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: dissovetsibadi@bk.ru\*).*

*Vitaliy V. Savinkin (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Dr of Sci. (Engineering), Scopus Author ID 57195726895, Associate Professor of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: cavinkin7@mail.ru).*

*Dmitriy A. Koptyaev (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Senior Lecturer of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: koptyev29@mail.ru).*

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЦЕПЕЙ И РАЗМЕРОВ ПЛАСТА ГРУНТА, ОТРЕЗАЕМОГО КОВШОМ АГРЕГАТА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ГРУНТА С ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

**В.А. Николаев**  
ФГБОУ ВО ЯТУ,  
г. Ярославль, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на ее строительство, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Он удаляет верхний слой грунта с половины подстилающего слоя автомобильной дороги и одного будущего кювета. При движении агрегата ковши отрезают пласт грунта снизу и сбоку. Для этого на каждом ковше установлено нижнее лезвие, правое лезвие и консольное лезвие, частично подрезающее верхний слой грунта снизу для прохода следующего ковша. Лезвие нижнего ножа направлено под углом  $10^\circ$  к планке крепления ковша, лезвие правого ножа и лезвие консольного ножа – под углом  $45^\circ$  к направлению перемещения ковша.

**Методика исследования.** Для определения скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом, проведён анализ кинематики ковша и выполнены математические преобразования. Для проверки полученных параметров рассмотрен поворот ковша на  $90^\circ$  на ведущей звёздочке нижнего привода. Выявлена схема сил, действующих на грунт, расположенный в ковше, при его повороте на ведущей звёздочке нижнего привода. На основе преобразований системы двух уравнений и неравенства установлено условие недопустимости высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущей звёздочке нижнего привода.

**Результаты.** Используя разработанную методику определения параметров, на основе принятых исходных данных вычислена скорость цепей, к которым присоединены ковши, и ширина пласта грунта, отрезаемого ковшом. Для проверки полученных параметров рассмотрен поворот ковша на  $90^\circ$  на ведущей звёздочке нижнего привода. После подстановки полученных значений параметров в неравенство установлено, что при таких параметрах ковша и ведущей звёздочки нижнего привода грунт не высыпается из ковша при его повороте.

**Заключение.** Из конструктивной компоновки агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги получены геометрические параметры ковша. На основе анализа кинематики взаимодействия ковша с грунтом выявлена скорость цепей, к которым присоединены ковши, и ширина пласта грунта, отрезаемого ковшом. Анализ сил, действующих на грунт, расположенный в ковше, в момент поворота ковша на ведущей звёздочке нижнего привода показал рациональность принятых и вычисленных параметров. На основе выявленных параметров можно определить затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автомобильная дорога, подстилающий слой, агрегат непрерывного действия, грунт, скорость цепей, размер пласта грунта.

Поступила 28.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: 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;17(1):32-43. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43>

## SOIL LAYER CUT OFF BY THE AGGREGATE FOR REMOVING THE TOPSOIL FROM THE ROAD SUBLAYER: DETERMINATION OF THE CHAIN SPEED AND SIZES

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,  
Yaroslavl, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** For the durable road at the minimum necessary cost of its construction the topsoil should be removed without affecting the ground. The problem of cheaper road construction without reducing the quality can be solved by creating an aggregate for the sublayer's formation. The aggregate removes the topsoil from half of the road sublayer and one of the ditch. The buckets of the moving aggregate cut off the soil layer from below and from one side. Therefore, each bucket is mounted by the bottom blade, the right blade and the console blade, partially cutting the topsoil from below for the passage of the next bucket. The blade of the lower knife with the 10 degrees' angle to the plank of the bucket; the blade of the right knife and the blade of the console knife – with the 45 degrees' angle towards the direction of the bucket moving.

**Materials and methods.** To determine the speed of chains and the size of the soil layer the author carried out the bucket kinematics' analysis and considered mathematical transformations. For checking the received parameters, the paper demonstrated the turn of the bucket on the leading 90 degrees' lower drive. The author revealed the scheme of forces acting on the ground, located in the bucket, when it turned on the leading lower drive. Based on the system's transformations of two equations and the inequality, the research established the inadmissibility of the bucket's phasing out when it turned on the leading lower drive.

**Results.** As a result, by using the developed method of determining parameters, based on the accepted raw data, the author calculated the speed of the chains, to which the buckets were attached, and the width of the soil, cut off by the bucket. After substitution of the received parameters in the inequality the author established that the ground would not fall out of the bucket by turning under such parameters of the bucket and of the leading lower drive.

**Discussion and conclusions.** As a result, the author obtains the geometric parameters from the structural layout of the aggregate for removing the topsoil from the road sublayer. Based on the analysis of the kinematics of the interaction of the bucket with the ground, the paper reveals the speed of the chains, to which the buckets are attached and the width of the soil layer cut off by the bucket. Analysis of the forces acting on the ground and locating in the bucket at the moment of the bucket turn on the leading lower drive shows the rationality of the accepted and calculated parameters. The author determines the energy costs of cutting the ground with the buckets of the aggregate for removing the topsoil from the road sublayer.

**KEYWORDS:** road, sublayer, aggregate of the continuous operation, ground, chains' speed, soil size.

**Submitted 28.01.2020, revised 21.02.2020.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

*For citation:* Nikolayev Vladimir A. Soil layer cut off by the aggregate for removing the topsoil from the road sublayer: determination of the chain speed and sizes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):32- 43. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43>

© Nikolayev V. A.



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

**ВВЕДЕНИЕ**

Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно

удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Обычно эту работу выполняют бульдозерами, экскаваторами и другими техническими средствами циклического действия (рисунок 1).



Рисунок 1 – Удаление верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги

Figure 1 – Removing the topsoil from the road sublayer

Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Агрегат содержит энергетическое устройство и рабочую часть. Он удаляет верхний слой грунта с половины подстилающего слоя автомобильной дороги и одного будущего кювета (рисунки 2, 3, 4)<sup>1</sup>.

К корпусу 1 энергетического устройства присоединён гидробак 3, гидроаппаратура ав-

тогоризонтالي 5, коробка отбора мощности 6 с предохранительным устройством. К корпусу также добавлены поводки 7, управляемые гидроцилиндрами автогоризонтالي 8. На поводках установлены ведущие колёса 2 и катки 4. Ведущие колёса и катки опоясаны гусеницами 25. К корпусу шарнирно присоединена навеска 10, изменяющая положение средней рамы 24 относительно энергетического устройства. К средней раме слева шарнирно присоединена левая рама 20, а к ней – консоль 21.

<sup>1</sup> Патент №2689007 РФ. Агрегат для удаления почвы с подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев, И.С. Тюремов. № 2018122727; заявл. 21.06.2018; опубл. 23.05.2019, бюл № 15. 11 с.

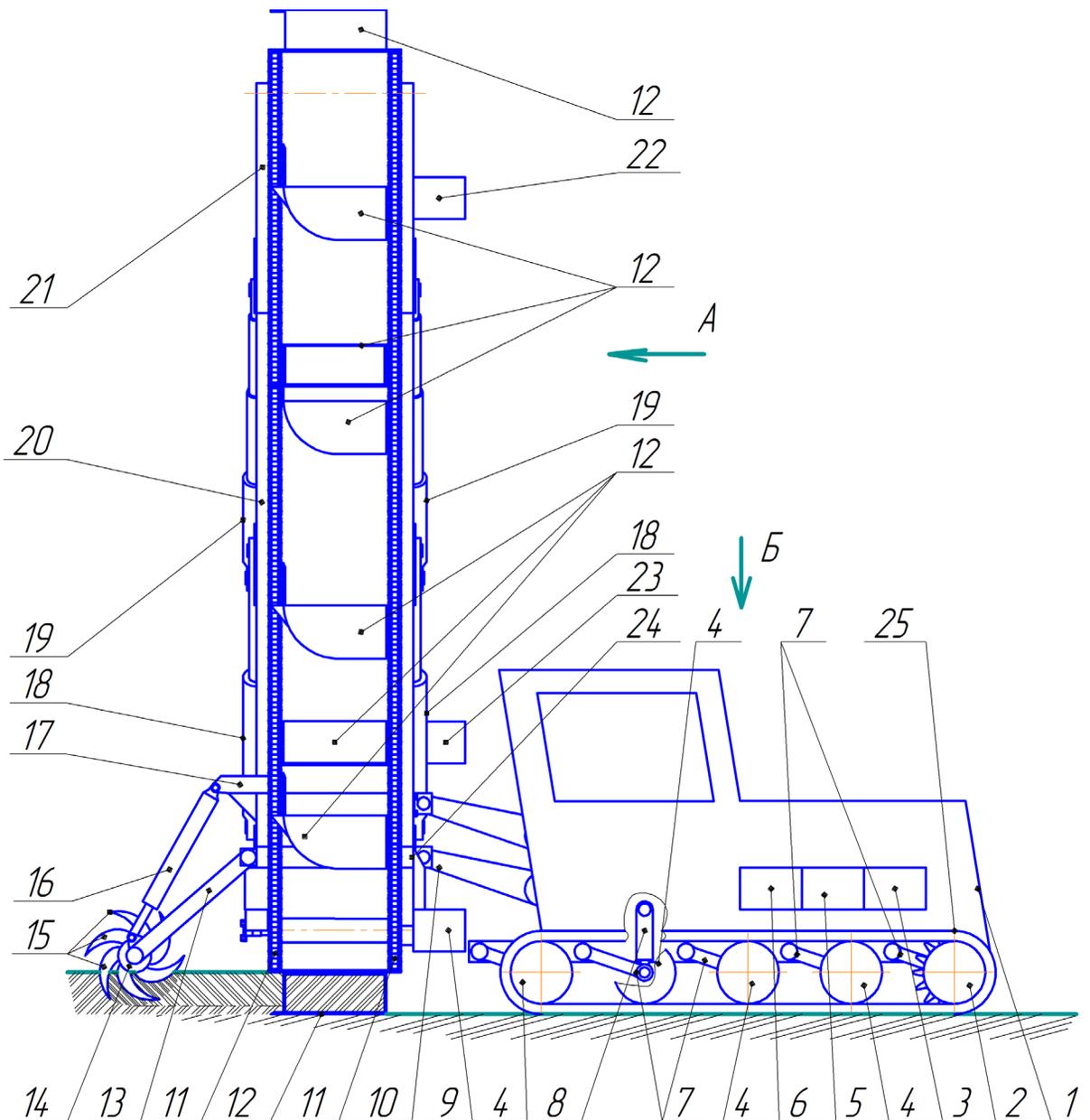


Рисунок 2 – Агрегат для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги, вид слева:

- 1 – корпус; 2 – ведущее колесо; 3 – гидробак; 4 – каток; 5 – гидроаппаратура автогоризонтالي;
- 6 – коробка отбора мощности; 7 – поводок; 8 – гидроцилиндр автогоризонтали;
- 9 – гидромотор нижнего привода; 10 – навеска; 11 – цепь; 12 – ковш; 13 – рамка рыхлителя;
- 14 – полая ось; 15 – рабочий орган рыхлителя; 16 – гидроцилиндр управления рыхлителем;
- 17 – кронштейн; 18 – гидроцилиндр управления левой рамой;
- 19 – телескопический гидроцилиндр; 20 – левая рама; 21 – консоль;
- 22 – гидромотор верхнего привода; 23 – гидромотор поворота; 24 – средняя рама; 25 – гусеница

Figure 2 – Aggregate for removing the topsoil from the road sublayer, the left view:

- 1 – body; 2 – leading wheel; 3 – hydrotank; 4 – roller; 5 – hydro-equipment of the auto-horizontal aggregate;
- 6 – power selection box; 7 – leash; 8 – hydrocylinder of the auto-horizontal aggregate; 9 – lower-wheel drive hydromotor;
- 10 – canopy; 11 – chain; 12 – ladle; 13 – ripper frame; 14 – hollow axis;
- 15 – working body of the ripper; 16 – hydraulic cylinder control ripper;
- 17 – bracket; 18 – hydraulic cylinder control of the left frame; 19 – telescopic hydraulic cylinder;
- 20 – left frame; 21 – console; 22 – hydromotor of the upper drive; 23 – hydromotor turning;
- 24 – medium frame; 25 – caterpillar

Положением левой рамы относительно средней рамы управляют два гидроцилиндра управления левой рамой 18, а консоли относительно левой рамы – два телескопических гидроцилиндра 19. К средней раме прикреплен гидромотор нижнего привода 9, передающий вращающий момент на звёздочку. На консоли установлена ещё одна звёздочка, приводимая от гидромотора верхнего привода 22. Звёздочки, ролики и поворотные ролики охвачены двумя цепями 11 с закреплёнными на них ковшами 12. К средней раме присоединена правая рама, положением которой относительно средней рамы управляет гидромотор поворота 23. К средней раме и правой раме присоединены рамки рыхлителей 13. В них установлены полые оси 14, в которых расположены рабочие органы рыхлителей 15. К средней раме и правой раме приварены кронштейны 17, а в них установлены гидроцилиндры управления рыхлителями 16, присоединённые также к рамкам рыхлителей.

Если рельеф поверхности весьма равнинный, оператор перед началом работы включает гидроаппаратуру автогоризонтали в автоматический режим. В этом режиме корпус энергетического устройства и рабочая часть агрегата будут находиться в строго горизонтальном положении. При наезде гусениц на микронеровности гидроаппаратура автогоризонтали подаёт рабочую жидкость в нужные гидроцилиндры автогоризонтали. Они воздействуют на поводки, а поводки – на катки и ведущие колёса, изменяя их положение так, чтобы корпус оставался в строго горизонтальном положении. Если рельеф поверхности более сложный, оператор задаёт на гидроаппаратуру автогоризонтали необходимый крен корпуса либо управляет положением корпуса энергетического устройства и устройства удаления верхнего слоя грунта вручную.

Оператор гидроцилиндром управления навеской опускает рабочую часть агрегата так, чтобы она не касалась грунта. Затем он опускает рыхлители на поверхность грунта и включает перемещение агрегата вперёд. Оператор задаёт такое давление в гидропневмоаккумуляторе управления рыхлителями, при котором рабочие органы рыхлителя погрузились бы в грунт полностью, но не было избыточной нагрузки на полые оси пассивных рыхлителей. Рабочие органы рыхлителей взрыхляют верхний слой грунта.

Не прекращая перемещение агрегата, оператор переводит гидроцилиндры управления навеской в «плавающее» положение. Вращающий момент от гидромотора нижнего при-

вода через редуктор, звёздочку поступает на цепи. Одновременно от гидронасоса рабочая жидкость поступает в гидромотор верхнего привода, который также создаёт вращающий момент, передаваемый через звёздочку на цепи. Угловая скорость вала гидромотора верхнего привода синхронизирована с угловой скоростью гидромотора нижнего привода. Ковши врезаются во взрыхлённый грунт. При перемещении справа налево (см. рисунок 3) ковши наполняются грунтом. Гидромотор подъёма перемещает ковши с грунтом вверх. Поворотные ролики на консоли установлены так, что от воздействия силы тяжести и центробежной силы инерции грунт из ковшей высыпается в мобильное транспортное средство «М» (см. рисунки 3, 4).

Ковши отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижнее лезвие «Н» (рисунок 5) отрезает слой грунта снизу, правое лезвие «П» – сбоку, а консольное лезвие «К» частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. Лезвие «Н» нижнего ножа направим под углом  $10^\circ$  к планке крепления ковша, то есть  $80^\circ$  к направлению перемещения ковша. Лезвие «П» правого ножа и лезвие «К» консольного ножа – под углом  $45^\circ$  к направлению перемещения ковша. При этом геометрические параметры ковша получаются из конструктивной компоновки агрегата.

В стенках корпуса ковша выполним прорези для установки ножей. Прорезь в правой стенке предназначена для установки консольного ножа К. Прорези, образующие правую щель ПЩ, левую щель ЛЩ, заднюю щель ЗЩ предназначены для установки нижнего ножа. К правому ножу припаяны направляющие пластины, а в правой стенке корпуса ковша выполнены пазы для установки правого ножа (рисунок 5, в). Правый нож вдвигают в корпус ковша так, чтобы направляющие пластины входили в пазы. Если лезвия ножей износились, вынимают сначала правый нож (рисунок 5, д) по направлению стрелки I. Потом вынимают нижний нож (рисунок 5, а), поворачивая его по направлению стрелки II. Далее вынимают из корпуса ковша консольный нож (рисунок 5, б), выдвигая его по направлению стрелки III. Установку ножей производят в обратном порядке. При установке в корпус ковша нижний нож прижимом фиксирует полку консольного ножа. Затем, после выдвигения, правый нож фиксирует в корпусе ковша нижний нож. Так осуществляется взаимное фиксирование ножей в корпусе ковша. Для исключения выпадения правого ножа его фиксируют в корпусе ковша кернением.

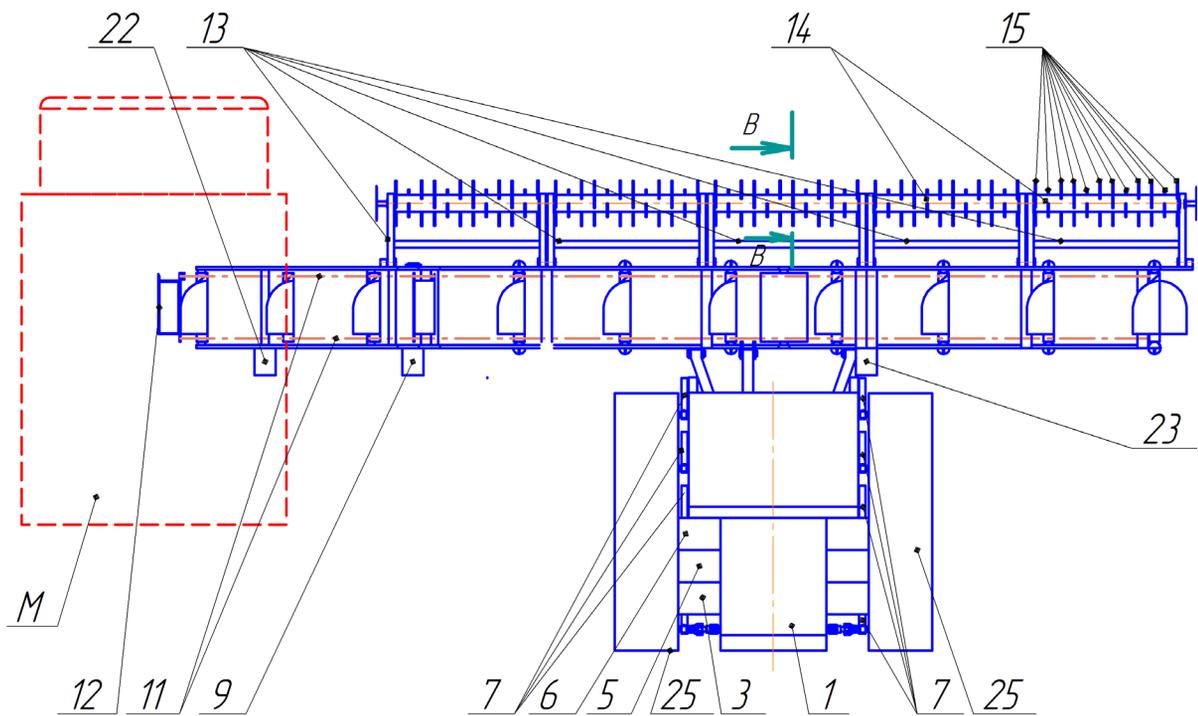


Рисунок 3 – Агрегат для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги, вид сверху (нумерация позиций одина)

Figure 3 – Aggregate for removing the topsoil from the road sublayer, top view

*Вид А*

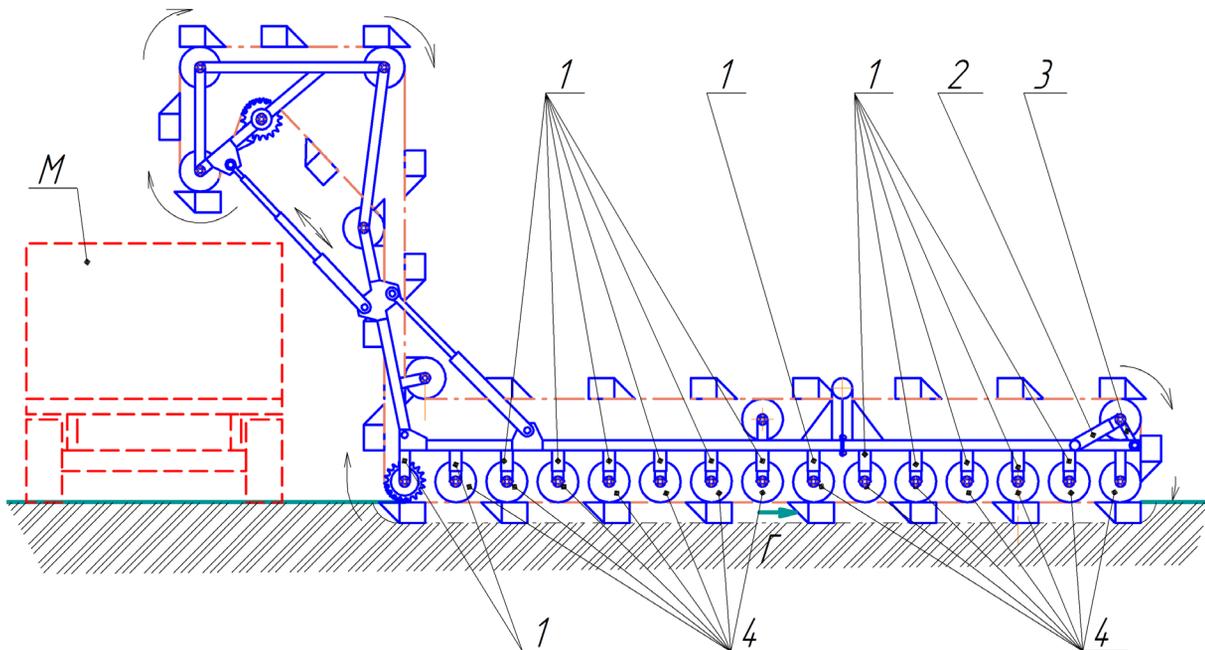


Рисунок 4 – Агрегат для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги, вид А

Figure 4 – Aggregate for removing the topsoil from the road sublayer, A view

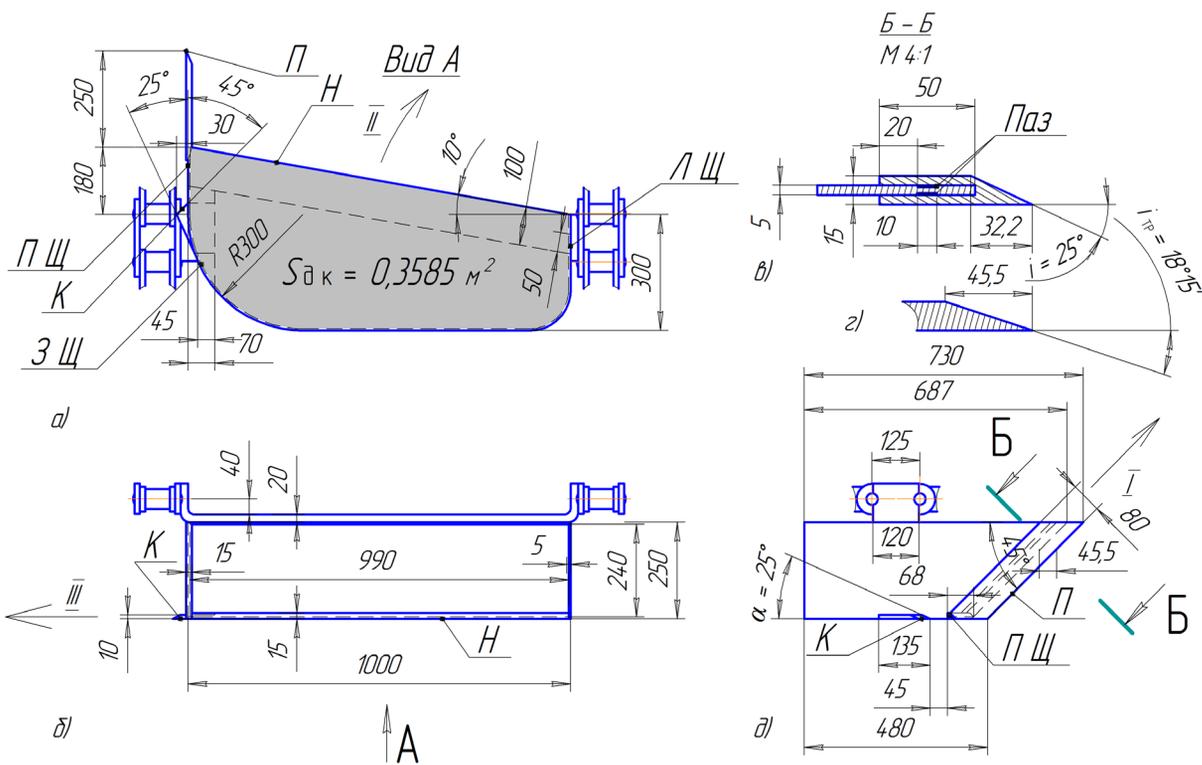


Рисунок 5 – Ковш: а – вид А; б – вид спереди; в – сечение Б – Б; г – трансформация угла заточки правого лезвия; д – вид слева

Figure 5 – Bucket: а – A view; б – front view; в – B – B section; г – transformation of the right blade sharpening corner; д – left view

Примем угол заточки лезвия правого ножа  $i = 25^\circ < \varphi_{с-п}$  (см. рисунок 5, в), тогда длина фаски  $32,2$  мм. Перенесём это расстояние на след секущей плоскости Б – Б. Измерим длину фаски в направлении перемещения ковша (см. рисунок 5, д) – получилось  $44,5$  мм. Изобразим отдельно сечение фаски горизонтальной плоскостью (рисунок 5, г) и определим трансформацию угла заточки правого лезвия  $i_{тр} = 18,25^\circ$ . Передний угол лезвия правого ножа  $\alpha_{пр} = i_{тр} = 18,25^\circ$ .

Из конструктивной компоновки: высота ковша  $0,25$  м, равная максимальной глубине снимаемого верхнего слоя грунта  $h_{сл} = 0,25$  м, ширина ковша  $1,0$ , длина левой стенки ковша  $0,3$  м, толщина его стенок  $5$  мм. Соответ-

ственно внутренние размеры: высота ковша  $h_k = 0,24$  м, ширина ковша  $b_k = 0,99$  м, длина левой стенки ковша  $l_k = 0,295$  м. Тогда площадь дна ковша  $S_{дк} = 0,3585$  м<sup>2</sup>, его объём  $V_k = S_{дк} h_k$ ;  $V_k = 0,086$  м<sup>3</sup>. Теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены<sup>2,3</sup> [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Однако представляет теоретический и практический интерес анализ резания грунта ковшами агрегата непрерывного действия.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определим скорость цепей и размеры пласта грунта, отрезаемого ковшем. Объём грунта, снимаемого агрегатом за секунду,

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М.: материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490-497.

$$V_{\text{сд}} = Bh_{\text{сд}}v_a, \quad (1)$$

где – скорость агрегата. Объем грунта, загружаемого в ковши агрегата за секунду,

$$V_{\text{заг}} = k_p Bh_{\text{сд}}v_a, \quad (2)$$

где – коэффициент, учитывающий увеличение объема грунта при его разрыхлении.

Количество ковшей, проходящих через продольное сечение агрегата за секунду,

$$n_k = \frac{V_{\text{заг}}}{V_k} = \frac{k_p Bh_{\text{сд}}v_a}{k_3 V_k}. \quad (3)$$

С другой стороны, количество ковшей, проходящих через продольно-поперечное сечение агрегата в секунду, зависит от скорости цепей и расстояния между ковшами:

$$n_k = \frac{v_{\text{ц}}}{l_{\text{мк}}}. \quad (4)$$

Отсюда  $\frac{k_p Bh_{\text{сд}}v_a}{k_3 V_k} = \frac{v_{\text{ц}}}{l_{\text{мк}}} \rightarrow k_p Bh_{\text{сд}}v_a l_{\text{мк}} = k_3 V_k v_{\text{ц}}$ ;

$$\frac{v_a}{v_{\text{ц}}} = \frac{k_3 V_k}{k_p Bh_{\text{сд}} l_{\text{мк}}}, \text{ или } v_{\text{ц}} = \frac{k_p Bh_{\text{сд}} l_{\text{мк}}}{k_3 V_k} v_a. \quad (5)$$

Так как количество ковшей, проходящих через продольное сечение агрегата за секунду, (формула 4), ширина пласта грунта, отрезаемого ковшем,

$$\delta = \frac{k_3 V_k}{k_p Bh_{\text{сд}}}. \quad (6)$$

Если известна объемная масса грунта, его масса в ковше

$$m_k = \frac{\rho k_3 V_k}{k_p}. \quad (7)$$

Существует опасность высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущей звёздочке нижнего привода. Для проверки полученных параметров рассмотрим поворот ковша на  $90^\circ$  на ведущей звёздочке нижнего привода (рисунок 6).

В момент начала поворота ковша на грунт, расположенный в ковше, действует сила  $G$  тяжести, центробежная сила инерции  $F_{\text{цб}}$  и сила инерции  $F_j$ , вызванная торможением грунта в начале поворота. При этом сила  $F_j$  стремится частично высыпать грунт из ковша, но этому препятствует неразработанный грунт ниже ковша. По мере поворота ковша сила всё более препятствует высыпанию грунта из

ковша. Сила  $F_{\text{цб}}$  в период поворота стремится частично высыпать грунт из ковша, но этому также препятствует неразработанный грунт ниже ковша. Сила инерции  $F_j$ , вызванная торможением грунта в начале поворота, стремится высыпать грунт, расположенный вблизи поверхности, из ковша.

Первыми освободятся частицы грунта вблизи точки А. Допустим, что со скоростью цепей  $v_{\text{ц}}$  после освобождения эти частицы будут лететь до встречи с нижней стенкой ковша  $l_{\text{п}}$  расстояние за время  $\tau_{\text{п}}$  (см. рисунок 6). Чтобы эти частицы не вылетели из ковша, за это же время нижняя стенка ковша должна повернуться на угол  $\varphi_{\text{п}}$ . Примем радиус начальной окружности ведущей звёздочки нижнего привода  $r_3$ .

Имеем систему двух уравнений и неравенства с тремя неизвестными

$$\begin{cases} l_{\text{п}} > v_{\text{ц}} \tau_{\text{п}} \\ \varphi_{\text{п}} = \omega_3 \tau_{\text{п}} \\ v_{\text{ц}} = \omega_3 r_3 \end{cases}$$

Из третьего уравнения  $\omega_3 = \frac{v_{\text{ц}}}{r_3}$ , подставив во второе уравнение, получим  $\varphi_{\text{п}} = \frac{v_{\text{ц}} \tau_{\text{п}}}{r_3}$ . Откуда  $v_{\text{ц}} \tau_{\text{п}} = \varphi_{\text{п}} r_3$ , подставив в первое уравнение, получим неравенство

$$l_{\text{п}} > \varphi_{\text{п}} r_3. \quad (8)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Из конструктивной компоновки ширина захвата агрегата для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги  $B = 7$  м. Примем скорость агрегата для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги:  $v_a = 0,085$ , коэффициент, учитывающий заполнение ковша  $k_3 = 0,8$ , коэффициент, учитывающий увеличение объема грунта при его разрыхлении,  $k_p \approx 1,3$ .

Скорость цепей из условия заполнения ковшей при максимальной глубине снимаемого слоя грунта (формула 5)

$$v_{\text{ц}} = \frac{1,3 \cdot 7 \cdot 0,25 \cdot 0,6}{0,8 \cdot 0,086} 0,085 = 1,686 \text{ м/с.}$$

Количество ковшей, проходящих через продольное сечение агрегата за секунду (формула 4)

$$n_k = \frac{1,686}{0,6} \approx 2,8 \text{ шт/с.}$$

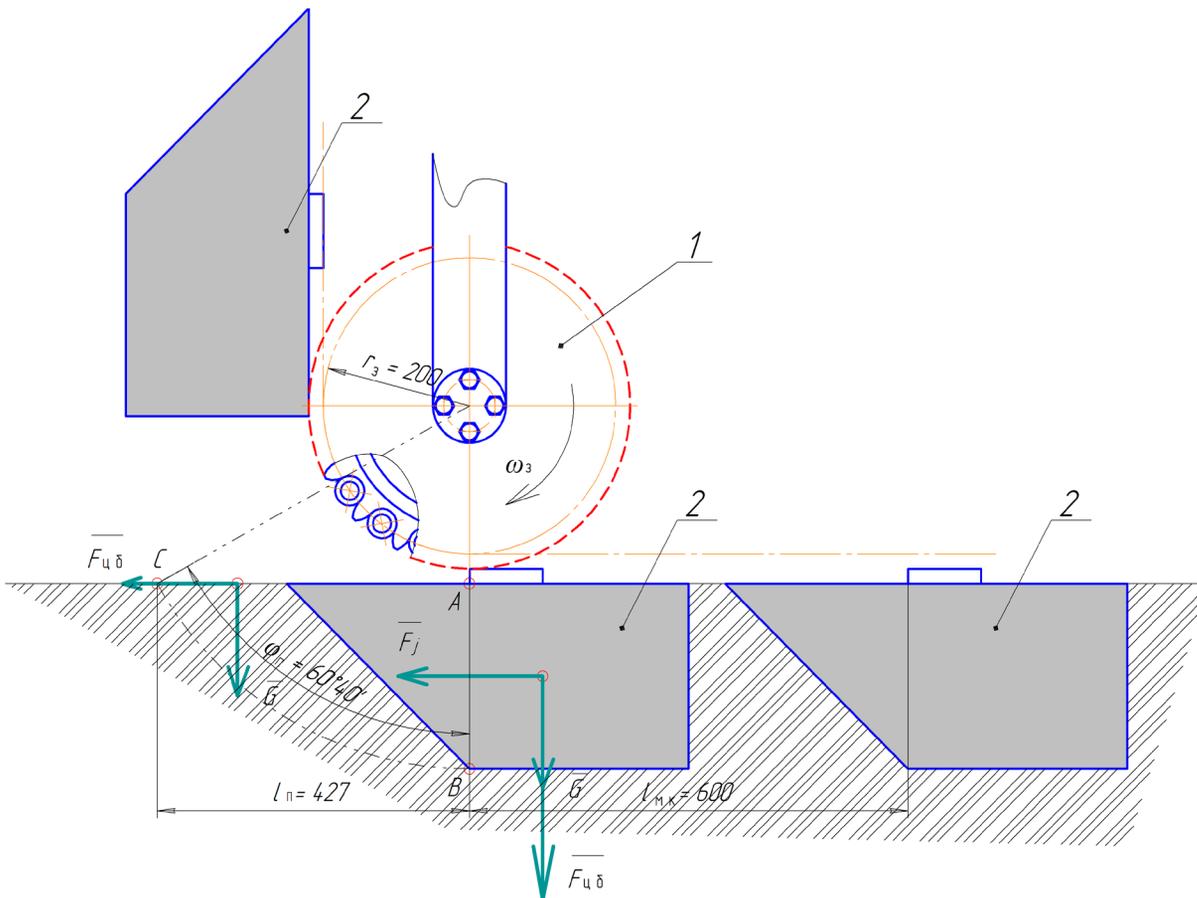


Рисунок 6 – Схема сил, действующих на грунт, расположенный в ковше, при его повороте на ведущей звёздочке нижнего привода: 1 – ведущая звёздочка нижнего привода; 2 – ковш

Figure 6 – Diagram of the forces acting on the ground and located in the bucket by switching on the leading lower drive: 1 – leading lower drive; 2 – ladle

Ширина пласта грунта, отрезаемого ковшом (формула 6)

$$\delta = \frac{0,8 \cdot 0,086}{1,3 \cdot 7 \cdot 0,25} \approx 0,03 \text{ м} = 30 \text{ мм.}$$

Примем ширину консольного лезвия  $b_k = 30 \text{ мм}$ , равную слою грунта, подрезаемую ковшом,  $\delta$ . Если объёмная масса грунта  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ , его масса в ковше (формула 7)

$$m_k = \frac{1600 \cdot 0,8 \cdot 0,086}{1,3} \approx 85 \text{ кг.}$$

Примем радиус начальной окружности ведущей звёздочки нижнего привода  $r_3 = 200 \text{ мм}$ . Подставив значения параметров: расстояние  $l_{п} = 427 \text{ мм}$  (см. рисунок 6), угол  $\varphi_{п} = 60,67^\circ \approx 1,0586 \text{ рад}$ ,  $r_3 = 200 \text{ мм}$ , в неравенство (8) получим:  $427 > 1,0586 \cdot 200$ .

Условие выполняется. При таких параметрах ковша и ведущей звёздочки нижнего привода грунт не высыплется из ковша при его повороте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из конструктивной компоновки агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги получены геометрические параметры ковша. На основе анализа кинематики взаимодействия ковша с грунтом выявлена скорость цепей, к которым присоединены ковши, и ширина пласта грунта, отрезаемого ковшом. Анализ сил, действующих на грунт, расположенный в ковше, в момент поворота ковша на ведущей звёздочке нижнего привода показал рациональность принятых и вычисленных параметров. На основе выявленных параметров можно определить затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги.

## 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 многолезковых 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. Pp. 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. Pp. 421–428.
10. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling // *Cold Regions Science and Technology*. 2013. Vol. 86. Pp. 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. Pp. 150–163.
12. Li Q. Development of Frozen Soil Model // *Advances in Earth Science*. 2006. № 12. Pp. 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. Ориентировочный расчёт мощности циклического резания грунта // *Вестник СибАДИ*. 2019. № 3. С. 228–240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>.
24. Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта // *Вестник СибАДИ*. 2019. № 9. С. 642–657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>.

## REFERENCES

1. Karasjov G.N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36–42 (in Russian).
2. Karnauhov A.I., Orlovskij S.N. Opredelenie zhatrat udel'noj jenerгии na process rezanija lesnyh pochv torcevnymi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20–22 (in Russian).
3. Kravec I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofreznoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofreznoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49 (in Russian).
4. Kirillov F.F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjavogovo usilija dlja mnogorezocvovych rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezocvovych working bodies of earthmoving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44–48 (in Russian).
5. Berestov E.I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34–38 (in Russian).
6. Vershinina A.V., Zubov V.S., Tjul'nev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofreznyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki mjrorzlyh gruntov [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of diskofreznyh mjrorzlyh soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42–44 (in Russian).
7. Balovnev V.I., Nguen Z.Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 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.Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevych sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12–15 (in Russian).
15. Nilov V.A., Fjodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7–10 (in Russian).
16. Chmil' V.P. Nasosno-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20 (in Russian).
17. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23–28 (in Russian).
18. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivlenija rezaniju grunta [On the impact of the speed of the working body on the force of resistance to ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37–43 (in Russian).
19. Konstantinov Ju.V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31–39 (in Russian).
20. Syromjatnikov Ju.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotnoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32–39 (in Russian).
21. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47–54 (in Russian).
22. Dranjaev S.B., Chatkin M.N., Korjavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a screw g-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13–19 (in Russian).
23. Nikolayev V.A. Approximate calculation of the circular soil cutting capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(3): 228–240 (in Russian). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>.

24. Nikolayev V.A. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(6): 642–657 (in Russian). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

*Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО Ярославский технический*

*университет (г. Ярославль, Московский пр., 88. e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).*

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*Vladimir A. Nikolaev – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Construction and Road Machines' Department, Yaroslavl Technical University (Yaroslavl, 88, Moskovsky Ave., e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).*

УДК 621.873.2/.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-44-56>

## ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ СОПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРА ВЫВЕШИВАНИЯ

**Д.А. Потахов**

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Контактное взаимодействие сопряженных элементов гидроцилиндра (поршня с гильзой, направляющей втулки с гильзой и штоком) определяют надежность работы гидродвигателя возвратно-поступательного движения. Оценка влияния зазоров сочлененных элементов гидроцилиндра является актуальной задачей ввиду того, что процесс формирования зазоров носит неотвратимый характер, так как трению всегда сопутствуют процессы трибологического изнашивания.

**Цель.** Настоящая работа посвящена определению и оценке влияния зазоров сопряженных элементов гидроцилиндра на напряженно-деформированное состояние контактирующих тел на примере гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного железнодорожного крана Сокол 80.01.

**Материалы и методы.** В качестве метода исследования используется конечно-элементный метод, реализуемый в модуле Simulation SolidWorks. В качестве критерия пластичности материала применяется критерий Губера–Мизеса. Рассмотрены теоретически возможные пространственные расчетные схемы нагружения в зависимости от типа контактирования сопряженных элементов гидроцилиндра.

**Результаты.** Приведены эпюры и графические зависимости, представляющие собой трехмерные поверхности, построенные по результатам численных экспериментов. В расчетах учтено совместное деформирование поршня, гильзы, штока, направляющей втулки и опорно-направляющих колец гидроцилиндра. Выполнен анализ полученных эпюр и зависимостей контактного взаимодействия гидроцилиндра для различных вариантов контактирования его элементов. Результаты могут быть использованы для исследования всех типов гидроцилиндров привода рабочего оборудования дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гидроцилиндр, метод конечных элементов, напряжения, деформации, грузоподъемный кран.

Поступила 26.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Потахов Д.А. Влияние зазоров сопряженных элементов на напряженно-деформированное состояние гидроцилиндра вывешивания. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1):44-56. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-44-56>

© Потахов Д.А.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-44-56>

## STRESSED-DEFORMED STATUS OF THE HANGING HYDROCYLINDER: INFLUENCE OF THE CONJUGATED ELEMENTS' PAIRS

**Denis A. Potakhov**

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, Russia*

### ABSTRACT

**Introduction.** *The contact interaction of the associated elements of the hydraulic cylinder (piston with sleeve, guide sleeve with cylinder and rod) determines the reliability of the reciprocating hydraulic motor. Assessing the effect of gaps of articulated hydraulic cylinder elements is an urgent task in view of the fact that the formation of gaps is inevitable, since friction is always accompanied by tribological wear processes.*

*The paper investigates the determination and assessment of the influence of the gaps of the hydraulic cylinders' mating elements on the stress-strain state of the contacting bodies on the example of the hydraulic cylinder for the Sokol 80.01 railway crane.*

**Materials and methods.** *The author used the finite element method implemented in the Simulation SolidWorks module. Moreover, the author applied the Huber–Mises criterion as a criterion for the material plasticity. The paper also considered theoretically possible spatial design schemes of loading and depending on the type of the mating elements' contacting of the hydraulic cylinder.*

**Results.** *As a result, the author presented plots and graphical dependences, which were three-dimensional surfaces constructed according to the results of numerical experiments. The calculations took into account the joint deformation of the piston, sleeve, rod, guide sleeve and supporting guide rings of the hydraulic cylinder. The author carried out the analysis of the obtained diagrams and dependences of the contact interaction of the hydraulic cylinder for various options of the elements contacting. The paper presented the results that were useful for studying all types of hydraulic cylinders and working equipment of the road, construction and hoisting-and-transport machines.*

**KEYWORDS:** *hydraulic cylinder, finite element method, stress, deformation, lifting crane.*

**Submitted 26.01.2020, revised 21.02.2020.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

*For citation:* Potakhov D.A. Stressed-deformed status of the hanging hydrocylinder: influence of the conjugated elements' pairs. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (1):44-56. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-44-56>

© Potakhov D. A.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Наличие зазоров, обусловленных технологией изготовления и постепенным износом контактирующих поверхностей в узлах «поршень – гильза» и «шток – направляющая втулка», приводит к несоосности (перекосу) штока и гильзы силового гидроцилиндра. В результате этого площадь контакта сопряженных элементов уменьшается, появляется явно выраженный односторонний (близкий к точечному) контакт сопрягаемых элементов. Это приводит, соответственно, к перераспределению полей напряжений в элементах гидроцилиндра; возникают концентраторы напряжений, обусловленные контактными напряжениями высокой интенсивности в подвижных сопряжениях и геометрической конфигурацией тел (направляющие пояски, конструктивные канавки под уплотнительные элементы и др.).

В связи с этим возникают местные пластические деформации направляющей втулки и внутренней поверхности гильзы (эллипсность по периметру, задиры, царапины, забоины и пр.) гидроцилиндра, возникает смятие трущихся поверхностей поршня (буртов и поясков) и изгиб штока, появляется интенсивный неравномерный износ уплотнительных элементов. Таким образом, происходит снижение надежности работы силового гидроцилиндра как по несущей, так и по герметизирующей способности [1, 2].

В зависимости от контакта сопряженных элементов силового гидроцилиндра возможны три варианта контактирования (рисунок 1, а). В первом варианте – зазор между штоком и направляющей втулкой существенно больше, чем между поршнем и гильзой ( $Z_1 \ll Z_2$ ); возникает контактная пара «поршень – гильза». Во втором варианте зазор между поршнем и гильзой существенно больше, чем между штоком и втулкой ( $Z_1 \gg Z_2$ ): контактная пара «направляющая втулка – шток». В третьем варианте контактирования зазор между поршнем и гильзой равен зазору между штоком и втулкой ( $Z_1 = Z_2$  или  $Z_1 \approx Z_2$ ): одновременный контакт «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток».

Определение деформаций и напряжений в областях контакта представляет значительный интерес, так как нагрузки, вызывающие местное разрушение материала в какой-либо точке тела могут быть существенно ниже нагрузок, при действии которых происходит нарушение прочности элемента (узла), препятствующее его дальнейшей эксплуатации. Особенно это важно для машин и механизмов, подверженных действию переменных нагрузок, так как согласно опытным данным концентрация напряжений сильнее влияет на прочность узлов и деталей, работающих при циклическом режиме нагружения<sup>1</sup>.

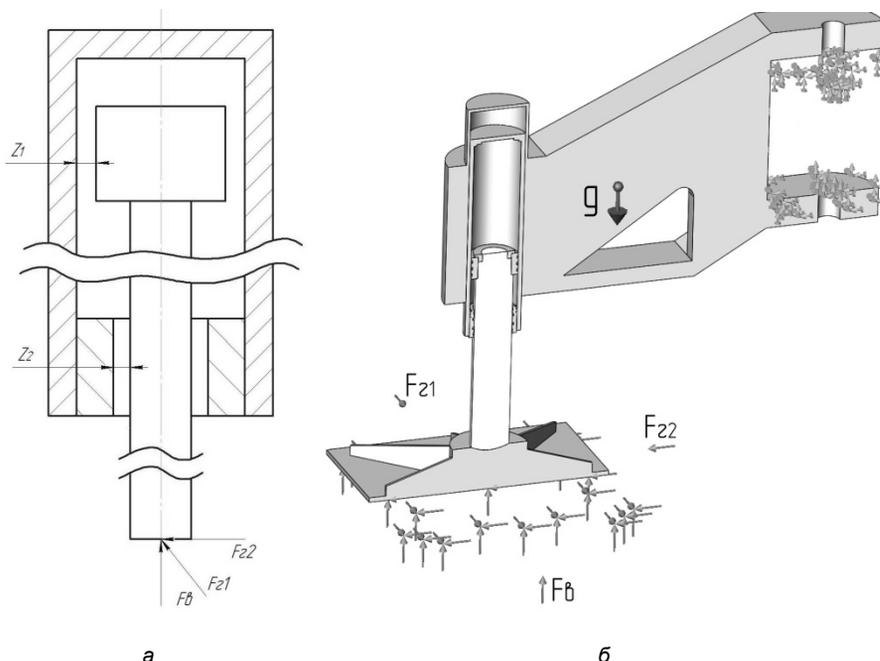


Рисунок 1 – Расчетные схемы:  
а – принципиальная; б – в Simulation SolidWorks

Figure 1 – Settlement schemes:  
а – principal; б – Simulation SolidWorks

В большинстве контактных задач зависимость между внешней силой и вызванным ею перемещением оказывается нелинейной (даже в упругой зоне материала)<sup>1</sup>. Это объясняется изменением площади взаимодействия в процессе нагружения и особенностью контактных задач являются значительные напряжения в зоне контакта.

При решении классических контактных задач рассматриваются случаи взаимодействия тел (деталей) довольно простой геометрической формы<sup>1</sup>. Однако реальные конструкции, такие как силовые гидроцилиндры, обладают сложной конфигурацией и могут передавать нагрузку через несколько зон контакта (узлов трения). При расчете таких конструкций необходимо учитывать одновременно местные и общие деформации элементов<sup>1</sup>.

Поэтому проводится численное моделирование с целью определения влияния действующих нагрузок, зазоров сопряженных элементов и конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние (НДС) гидроцилиндра вывешивания и исследования процессов контактного взаимодействия сочленений гидроцилиндра. Численное моделирование осуществляется в модуле Simulation SolidWorks, основанном на методе конечных элементов (МКЭ) [3, 4]. МКЭ имеет ряд достоинств, одним из которых является универсальность по отношению к геометрии исследуемой области и реологии деформирования материала<sup>2</sup>, что позволяет наиболее полно воспроизводить и исследовать режимы и условия нагружения исследуемых объектов. Помимо этого, использование математических методов моделирования позволяет учесть совместную деформацию и изменение конфигурации конструктивных элементов деталей.

В литературе достаточно примеров применения методов численного моделирования в решении практических и теоретических задач, в которых отмечается положительный эффект используемых методов [5, 6, 7].

В работах, посвященных аналитическим и экспериментальным исследованиям надежности работы гидроцилиндров, рассматриваются: несущая способность, устойчивость, условия закрепления, жесткость конструктивных

узлов, герметичность, критические нагрузки, долговечность уплотнений и сопряженных элементов гидроцилиндра [1, 8, 9, 10, 11].

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В качестве объекта исследования принят гидроцилиндр вывешивания железнодорожного грузоподъемного крана Сокол 80.01. С целью наиболее точного представления о характере нагружения гидроцилиндра вывешивания рассматривается совместно с выносной опорой (аутригером) грузоподъемного крана (рисунок 1, б).

Опорные элементы грузоподъемных машин в процессе эксплуатации находятся в условиях значительных продольных давлений. Реакции выносных элементов некоторых типов грузоподъемных кранов могут достигать значительных величин; так, согласно грузовой характеристикам максимальная грузоподъемность следующих типов грузоподъемных кранов на железнодорожном ходу достигает: Сокол 80.01 – 80 т, ЕДК-500 – 80 т, ЕДК-1000 – 125 т, ЕДК-2000 – 250 т, СМ-515 – 80 т, СМ-539 – 150 т, Multi Tasker KRC 500 – 80 т, Multi Tasker KRC 1200 – 160 т.

Выход из строя гидроцилиндра вывешивания во время работы с достаточно высокой долей вероятности приведет к снижению уровня безопасной эксплуатации погрузочно-разгрузочных работ, а также значительным материальным затратам, поэтому повышение надежности эксплуатации силовых опорных гидроцилиндров грузоподъемных кранов является особенно актуальным [12].

Деформации реальных конструкций большей частью развиваются по всем направлениям, т.е. соответствуют объемному (трехосному) деформированному состоянию, поэтому гидроцилиндр рассматривается в трехмерной постановке. Для этого создается и исследуется объемная модель объекта исследования в программном комплексе SolidWorks (см. рисунок 1, б). Адекватность численной модели определяется геометрическим соответствием конструктивной структуры узлов и деталей, точностью воспроизведения условий взаимодействия элементов между собой, соответствием механических свойств используемых материалов.

<sup>1</sup> Биргер И. А. [и др.] Расчет на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

<sup>2</sup> Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.

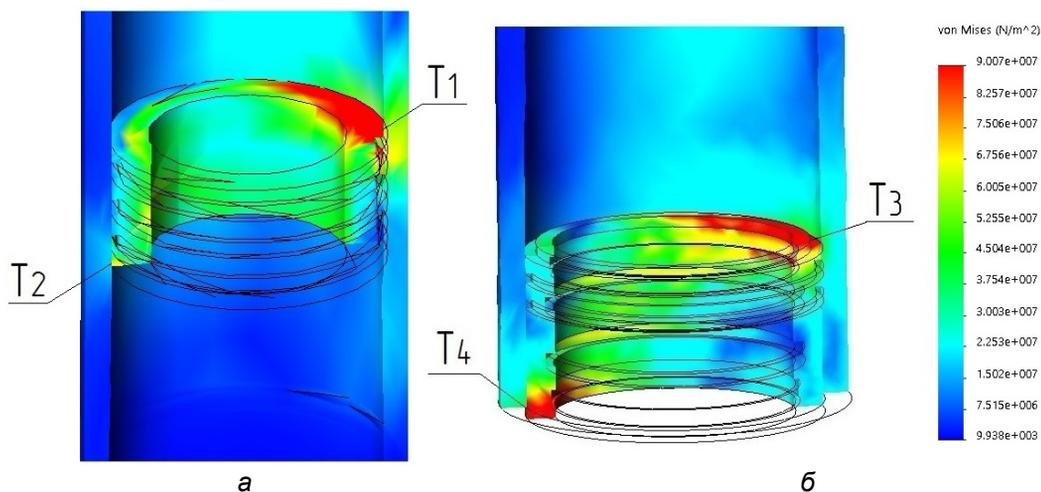


Рисунок 2 – Эпюры напряжений контактных пар:  
 а – «поршень – зеркало гильзы»; б – «направляющая втулка – зеркало гильзы»,  
 «шток – направляющая втулка»  
 \*шток и другие элементы – скрыты или прозрачны  
 \*в областях, отмеченных красным цветом, напряжения  $\geq 90,07$  МПа

Figure 2 – Plots of contact pair voltages:  
 а – “piston – mirror sleeve”; б – “guide sleeve – sleeve mirror”, “rod – guide sleeve”  
 \*stock and other elements – hidden or transparent  
 \*in red marked areas, voltages  $\geq 90.07$  MPa

Гидроцилиндр вывешивания рассматривается с установленными штоковыми и поршневыми опорно-направляющими кольцами (направляющими поясками). Направляющие кольца необходимы для обеспечения прямолинейности движения штока и поршня, а также для предотвращения контакта штока и поршня с гильзой. Материал направляющих колец в расчете – полиацеталь (ПОМ). Полиацеталь имеет высокий модуль упругости материала и получил широкое распространение в производстве опорно-направляющих колец.

Гидроцилиндр в процессе функционирования подвержен продольно-поперечному нагружению и находится в сложном напряженном состоянии. Расчет проводится при следующем режиме нагружения: одновременном действии продольной (вертикальной) сжимающей ( $F_B = 100 \dots 700$  кН,  $F_{BMAX} = 700$  кН) и поперечных (горизонтальных) ( $F_{r1} = 6100$  Н,  $F_{r2} = 6700$  Н) сил (см. рисунок 1).

Продольное усилие является вертикальной составляющей реакции выносной опоры грузоподъемного крана в процессе работы, обусловленное действием транспортируемого груза и эксплуатационного азимутального положения стрелового оборудования. Попереч-

ные усилия – горизонтальные составляющие реакций выносных опор, при этом действие только продольной нагрузки соответствует штатному режиму нагружения, горизонтальной и вертикальной нагрузки – нештатному. Принимается, что нагружение конструкции является квазистатическим, при котором временными эффектами можно пренебречь.

Рассматриваются три варианта контактирования сопряженных элементов опорного гидроцилиндра. В процессе численного расчета варьировались следующие параметры: величина зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$ , продольная нагрузка  $F_B$  (см. рисунок 1).

В результате проведенных расчетов определено НДС конструктивных элементов гидроцилиндра вывешивания в зависимости от варианта контактирования сопряженных элементов; приведены эпюры и графические зависимости, построенные по результатам численных экспериментов. В качестве критерия пластичности материала применяется критерий Губера–Мизеса, основанный на гипотезе энергии формоизменения<sup>3</sup> [13].

На рисунке 2, а представлена эпюра напряжений гильзы и поршня гидроцилиндра первого варианта контактирования ( $0 \leq Z_1 \ll Z_2$ ;

<sup>3</sup> Теребушко О.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 320 с.

наблюдаются несколько зон контакта: точки  $T_1$  и  $T_2$ ,  $\sigma_{T1} > \sigma_{T2}$ . А на рисунке 2, б представлена эпюра напряжений гильзы и втулки гидроцилиндра второго варианта контактирования ( $0 \leq Z_2 \ll Z_1$ ); аналогично наблюдаются несколько зон контакта: точки  $T_3$  и  $T_4$ ,  $\sigma_{T3} > \sigma_{T4}$ . Нужно отметить, что в расчетах рассматривается совместное деформирование и изменение конфигурации конструктивных компонентов гидроцилиндра – а на эпюрах приводятся отдельные элементы (поршень, гильза, втулка) со скрыванием других для более наглядного представления нагружения рассматриваемых объектов.

Взаимодействие элементов происходит по краевым и противоположным участкам поршня с зеркалом гидроцилиндра и втулки с цилиндрической поверхностью штока и гильзы (рисунок 2). При этом наблюдается явно выраженный максимум контактного взаимодействия; ярко выражена местная деформация стенки гильзы (точки  $T_1, T_3$ ).

Следовательно, при таком режиме нагружения, в случаях, когда поперечные нагрузки не меняют свое направление в процессе нагружения, одна сторона трущихся элементов гидроцилиндра перегружается, а другая – разгружается (не догружается).

По результатам расчета построены графические зависимости – поверхности максимальных напряжений поршня ( $\sigma_n$ ) и направляющей втулки ( $\sigma_b$ ) гидроцилиндра в месте контакта с гильзой (точки  $T_1, T_3$ ) в зависимости от сочетаний вертикальной нагрузки ( $F_B$ ) и величины зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$  с учетом действия поперечных сил ( $F_{r1} = \text{const}, F_{r2} = \text{const}$ ) (рисунок 3). Характер полученных зависимостей близок к линейной закономерности.

При контактном взаимодействии элементов передача давлений происходит по весьма малым площадкам. Вследствие появления и увеличения зазоров контактных пар площадь взаимодействия уменьшается, увеличивается

угловой перекося элементов, возникает эксцентричность приложения осевой нагрузки. Это приводит к повышению радиальных нагрузок в сопряжениях «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток». Следовательно, повышаются действующие напряжения и деформации в областях контакта.

Из анализа полученных зависимостей (см. рисунок 3) следует, что для гидроцилиндра первого варианта контактирования: максимальные напряжения поршня при нагрузке на оголовки штока  $F_{BMAX}, F_{r1}, F_{r2}$  при  $Z_1 = 0,3$  мм увеличиваются на  $\approx 22\%$ , а при  $Z_1 = 0,5$  мм на  $\approx 38\%$  по сравнению с  $Z_1 = 0$  мм. Для гидроцилиндра второго варианта контактирования: максимальные напряжения направляющей втулки при нагрузке на оголовки штока  $F_{BMAX}, F_{r1}, F_{r2}$  при  $Z_2 = 0,3$  мм увеличиваются на  $\approx 42\%$ , а при  $Z_2 = 0,5$  мм на  $\approx 53\%$  по сравнению с  $Z_2 = 0$ . Таким образом, увеличение зазоров в сочленениях силового гидроцилиндра приводит к изменениям условий и характера взаимодействия между элементами, что способствует снижению надежности функционирования силовых гидроцилиндров.

Для обработки полученных численных экспериментальных данных используется полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^k$ , широко применяемый в научно-исследовательской деятельности анализа результатов натурных экспериментов<sup>4</sup> [14, 15]. Проводимый ПФЭ с целью получения функций  $\sigma_n = f(Z_1, F_B)$ ,  $\sigma_b = f(Z_2, F_B)$  включает в себя следующие этапы: проверка воспроизводимости результатов численных экспериментов по критерию Кохрена (результаты воспроизводимы); построение математических моделей с расчетом коэффициентов уравнения регрессии; проверка адекватности математических моделей согласно критерию Фишера (модели адекватны); интерпретация уравнений регрессии.

Полученные уравнения регрессии для  $\sigma_n$  ( $y_n$ ) и для  $\sigma_b$  ( $y_b$ ) при  $Z_1$  (мм),  $Z_2$  (мм) и  $F_B$  (кН) имеют вид

$$y_n = 38,3 - 11,8Z_1 + 0,237F_B + 0,237Z_1F_B, \quad (1)$$

$$y_b = 20,7 + 39,2Z_2 + 0,256F_B + 0,247Z_2F_B. \quad (2)$$

<sup>4</sup> Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

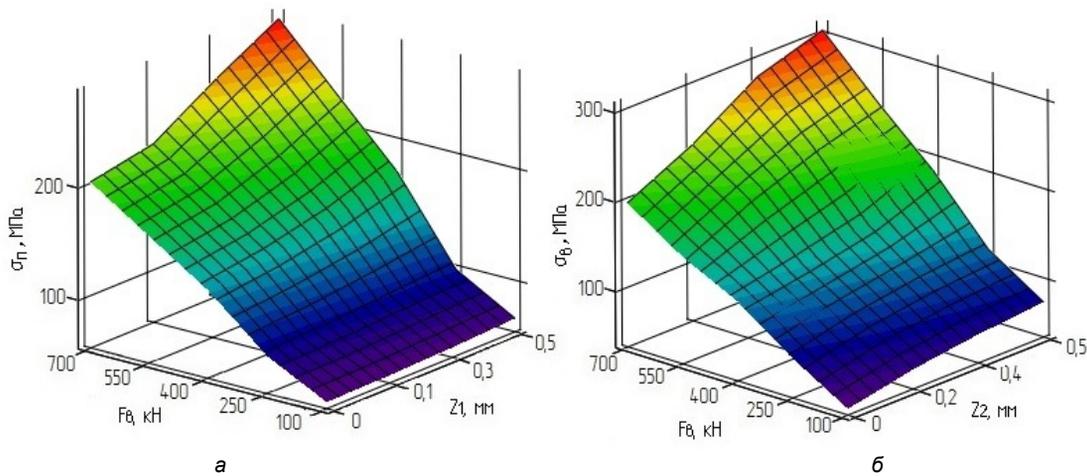


Рисунок 3 – Поверхности напряжений:  
 а – поршня гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с гильзой в точке  $T_1$  ( $0 \leq Z_1 \ll Z_2$ );  
 б – втулки гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с гильзой в точке  $T_3$  ( $0 \leq Z_2 \ll Z_1$ )

Figure 3 – Stress surfaces:  
 а – hanging cylinder piston at the point of contact with the sleeve at  $T_1$  ( $0 \leq Z_1 \ll Z_2$ );  
 б – hanging cylinder liners at the point of contact with the sleeve  $T_3$  ( $0 \leq Z_2 \ll Z_1$ )

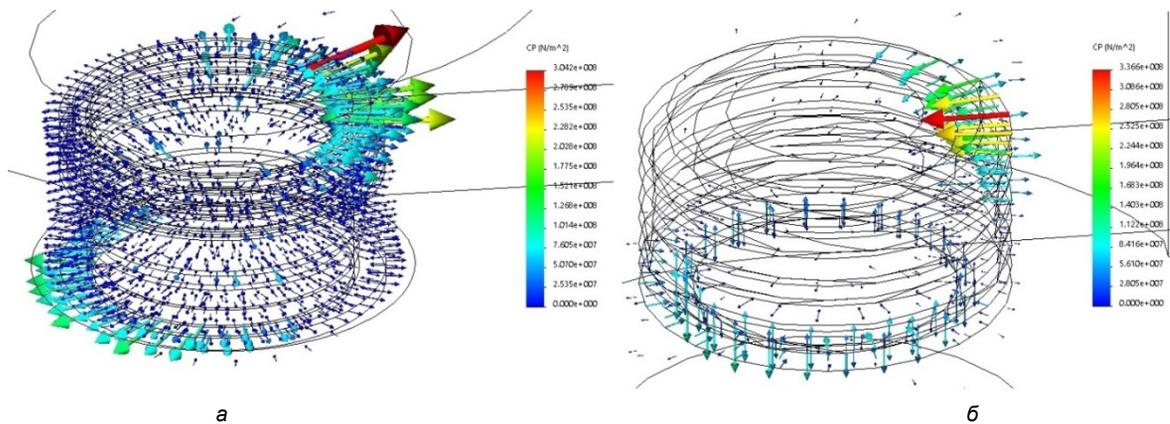


Рисунок 4 – Эпюры вектора контактных напряжений сопряженных элементов гидроцилиндра:  
 а – сопряжение «шток – направляющая втулка – гильза»; б – сопряжение «поршень – гильза»

Figure 4 – Plots of the vector of contact stresses of the hydraulic cylinder associated elements:  
 а – pairing "rod – guide sleeve – sleeve"; б – conjugation "piston – sleeve"

На основании полученных уравнений регрессии можно сделать следующий вывод: наибольшее влияние оказывают факторы  $Z_1$  и  $Z_2$  (величина зазора), так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент. Однако это справедливо только при соблюдении размерности расчетов «мм – кН».

На рисунках 4, 5 представлены эпюры вектора контактных напряжений и результирующие горизонтальные силы контакта ( $R_F$ ) трущихся поверхностей поршня и втул-

ки гидроцилиндров первого и второго варианта контактирования при следующем режиме нагружения:  $F_{\text{ВМАХ}}$ ,  $F_{\Gamma_1}$ ,  $F_{\Gamma_2}$ ,  $Z_1 = 0,5$  мм,  $Z_2 = 0,5$  мм. Контакт краевых областей сопряженных элементов характеризуется наибольшим значением контактного давления; к середине контактные напряжения снижаются. Согласно полученным данным можно сделать вывод, что верхний бурт поршня (см. рисунок 5) более чем в два раза перегружается по сравнению с другими буртами:  $R_{\Gamma_1}^1 = \max$ ,  $R_{\Gamma_1}^2 \approx 44\%R_{\Gamma_1}^1$ ,

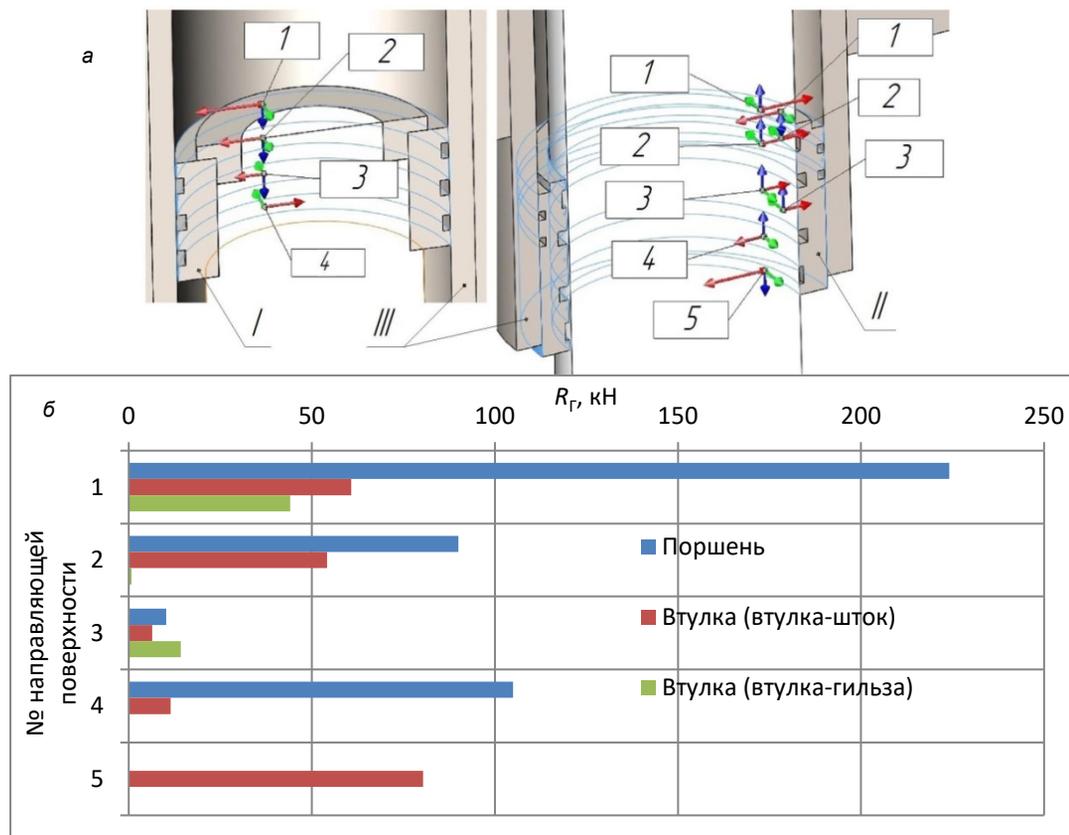


Рисунок 5 – Результаты расчета сил контакта контактирующих поверхностей элементов гидроцилиндра: а – векторы сил контакта; б – результирующая горизонтальная сила контакта ( $R_r$ ); I – поршень; II – направляющая втулка; III – гильза; 1, 2, 3, 4, 5 – номера (№) поверхностей

Figure 5 – Calculation results of the contact forces of the contacting surfaces of the hydraulic cylinder elements: а – contact force vectors; б – resulting horizontal contact force ( $R_r$ ); I – piston; II – guide sleeve; III – sleeve; 1, 2, 3, 4, 5 – numbers (№) of surfaces

$R_{ГП}^3 \approx 5\%R_{ГП}^1$ ,  $R_{ГП}^4 \approx 43\%R_{ГП}^1$ , в то время как краевые направляющие поверхности втулки (см.рисунок 5) подвержены более равномерному нагружению:  $R_{ГВ}^5 = \max$ ,  $R_{ГВ}^1 \approx 76\%R_{ГВ}^5$ ,  $R_{ГВ}^2 \approx 67\%R_{ГВ}^5$ ; центральные направляющие характеризуются наименьшей величиной силы контакта:  $R_{ГВ}^3 \approx 8\%R_{ГВ}^5$ ,  $R_{ГВ}^4 \approx 14\%R_{ГВ}^5$ .

При этом соотношение  $R_{ГП}^{1-4}$ ,  $R_{ГВ}^{1-5}$  остается схожим при различных значениях зазоров  $Z_1$  и  $Z_2$ , а результирующие горизонтальные силы контакта для каждой трущейся поверхности имеют свое направление (см. рисунок 5). Таким образом, контактирующие поверхности элементов гидроцилиндра в процессе эксплуатации нагружены неравномерно как по величине, так и по направлению.

На рисунке 6 приведены результирующие горизонтальные силы контакта ( $R_r$ ) направляющих поясков поршня гидроцилиндра первого варианта контактирования в зависимости от нагружения:  $H_1 - F_{ВМАХ}, F_{Г1}, F_{Г2}, Z_1; H_2 - F_{ВМАХ}, Z_1; H_3 - F_{ВМАХ}$ . Наибольшему, существенному нагружению подвержен первый пояс. Полученная диаграмма (рисунок 6, б) позволяет оценить значимость влияния рассматриваемого фактора нагружения на величину  $R_r$  пояска в зависимости от пространственного положения опорно-направляющего кольца. Например, для первого пояска:  $R_{ГП1} > R_{ГП3}$  на  $\approx 40\%$ ; для второго:  $R_{ГП1} > R_{ГП3}$  на  $\approx 55\%$ ; для третьего:  $R_{ГП1} > R_{ГП3}$  на  $\approx 70\%$ .

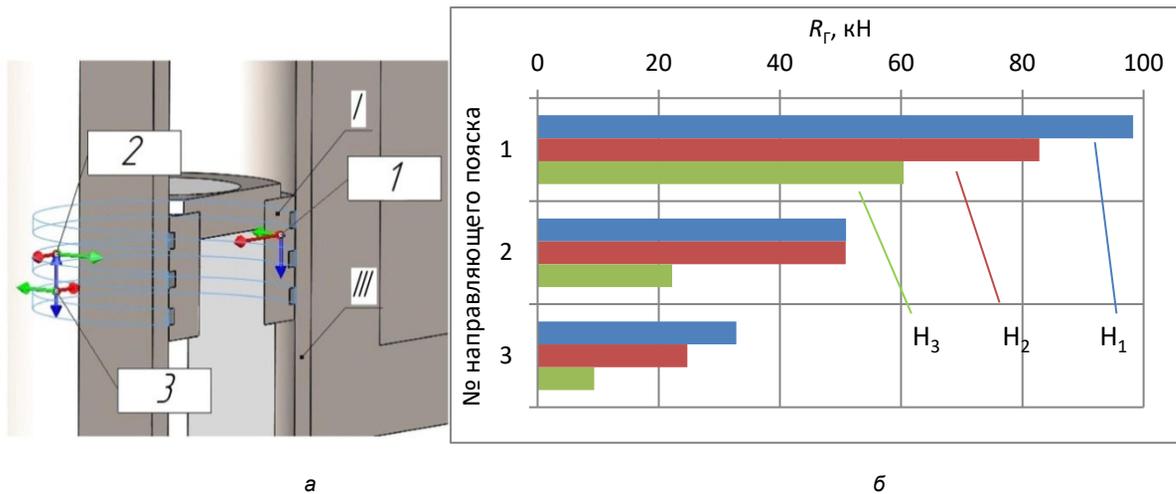


Рисунок 6 – Результаты расчета сил контакта направляющих поясков поршня:  
 а – векторы сил контакта в результате нагружения  $H_i$ ;  
 б – сравнение результирующих горизонтальных сил контакта ( $R_r$ ) направляющих поясков поршня в зависимости от нагружения;  
 I – поршень; III – гильза; 1, 2, 3 – номера (№) направляющих поясков

Figure 6 – Results of calculating the contact forces of the piston guide belts:  
 а – contact force vectors as a result of loading  $H_i$ ;  
 б – comparison of the resulting horizontal contact forces ( $R_r$ ) of the piston guide belts depending on loading;  
 I – piston; III – sleeve; 1, 2, 3 – numbers (№) of guide belts

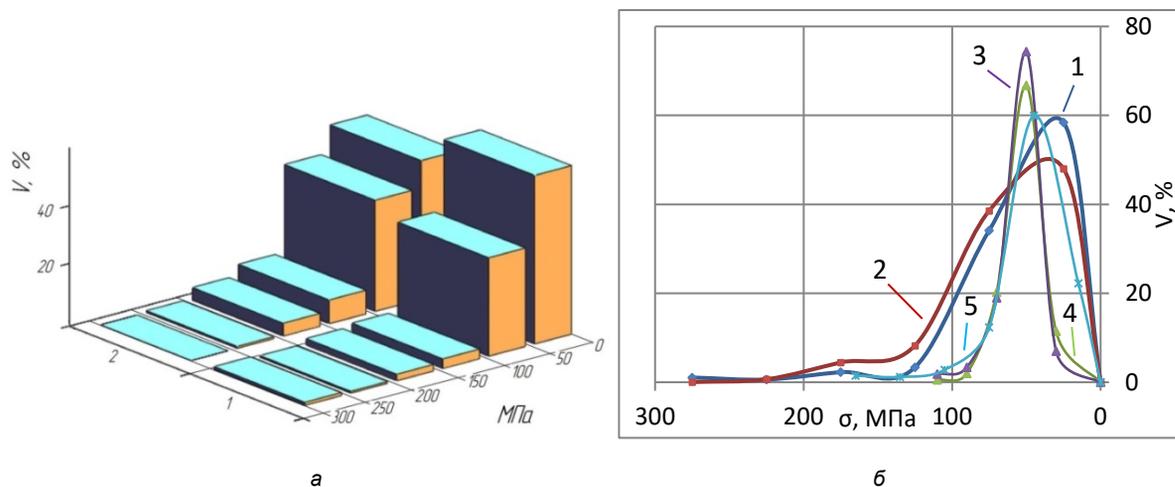


Рисунок 7 – Распределение напряжения по объему элементов:  
 а – гистограммы; б – аппроксимирующие кривые.  
 Первый вариант контактирования: 1 – поршень; 4 – шток; 5 – поршень, нагрузка только  $F_{BMAX}$   
 Второй вариант контактирования: 2 – направляющая втулка; 3 – шток

Figure 7 – Voltage distribution over the volume of elements:  
 а – histograms; б – approximating curves.  
 The first contacting option: 1 – piston; 4 – stock; 5 – piston, load only  $F_{BMAX}$   
 The second contact option: 2 – guide sleeve; 3 – stock

На рисунке 7 приведены графические представления (гистограммы и аппроксимирующие кривые) распределения напряжения по объему поршня, направляющей втулки и штоков в процессе нагружения гидроцилин-

дров. Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что распределение напряжения по объему конструктивных элементов опорного гидроцилиндра характеризуется явной неравномерностью, которая связана

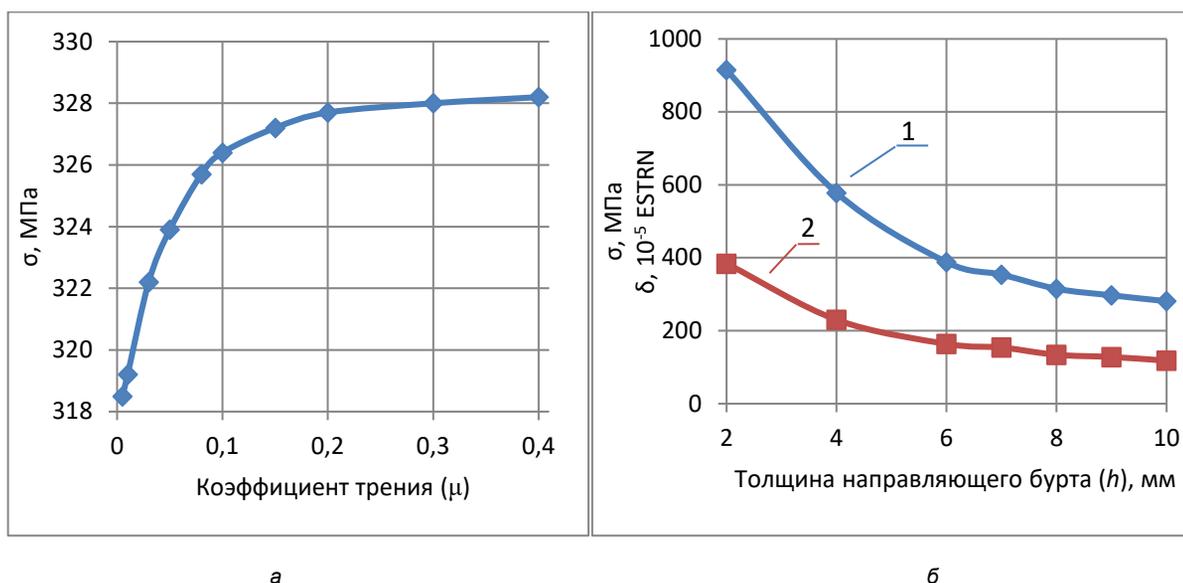


Рисунок 8 – Результаты расчета первого бурта поршня:  
 а – изменение напряжения поршня в точке контакта с гильзой;  
 б – изменение напряжений (1) и деформации (2) направляющего бурта поршня

Figure 8 – Calculation results of the first piston shoulder:  
 а – change in piston voltage at the point of contact with the sleeve; б – change in stresses (1) and deformation (2) of the piston guide shoulder

с механическими свойствами материалов, геометрическими параметрами, условиями нагружения и контакта объектов. При возрастании зазоров контактных пар происходит перераспределение полей напряжений, сопровождающееся увеличением максимальных контактных давлений.

Полученные гистограммы и аппроксимирующие кривые (см. рисунок 7) можно характеризовать как плотность распределения напряжений по элементам. В рассматриваемых случаях максимальным напряжениям (если рассматривать диапазон напряжений  $[0,8\sigma_{MAX}; \sigma_{MAX}]$ ) подвержены до 1,5% объема ( $V$ ) элементов. Согласно результатам расчета  $\approx 58\%$  объема поршня находится под действием  $\sigma = 0 - 50$  МПа, а  $\approx 34\%$  объема поршня находится под действием  $\sigma = 50 - 100$  МПа (см. рисунок 7).

В случае действия только вертикальной нагрузки распределение напряжения по элементам гидроцилиндра носит более равномерный характер – это можно проследить, например, по распределению напряжений по объему поршня гидроцилиндра, нагруженного только продольной силой (см. рисунок 7).

Зависимость максимальных напряжений ( $\sigma$ ) и деформаций ( $\delta$ ) первого бурта поршня (см. рисунки 4, 5) от значения его толщины ( $h$ )

представлена на рисунке 8, б. Уменьшение толщины бурта характеризуется существенным увеличением напряжений и деформаций. Так, например, для рассматриваемого случая при уменьшении параметра  $h$  с 10 мм до 7 мм действующие напряжения увеличиваются на  $\approx 26\%$ , а до 4 мм – на  $\approx 106\%$ ; наблюдается криволинейность, которая близка к экспоненциальной, в характере изменений напряжений и деформации это указывает на превышение действующих напряжений предела текучести конструкционного материала, в случае чего возникают пластические деформации верхних слоев буртов поршня.

В результате исследования установлено, что при увеличении коэффициента трения контактной пары «поршень – гильза» ( $\mu$ ) с 0,005 до 0,4 действующие напряжения поршня (первый направляющий бурт (см. рисунки 4, 5)) возросли на  $\approx 3\%$  (рисунок 8, а).

На рисунке 9 представлены эпюры напряжений некоторых элементов (гильза, поршень, направляющая втулка) гидроцилиндра третьего варианта контактирования ( $Z_1 = Z_2$  или  $Z_1 \approx Z_2$ ). Контакт возникает одновременно по краевым и противоположным относительно друг друга участкам поршня с зеркалом гидроцилиндра и втулки с цилиндрической поверхностью штока (точки  $T_5, T_6$ ).

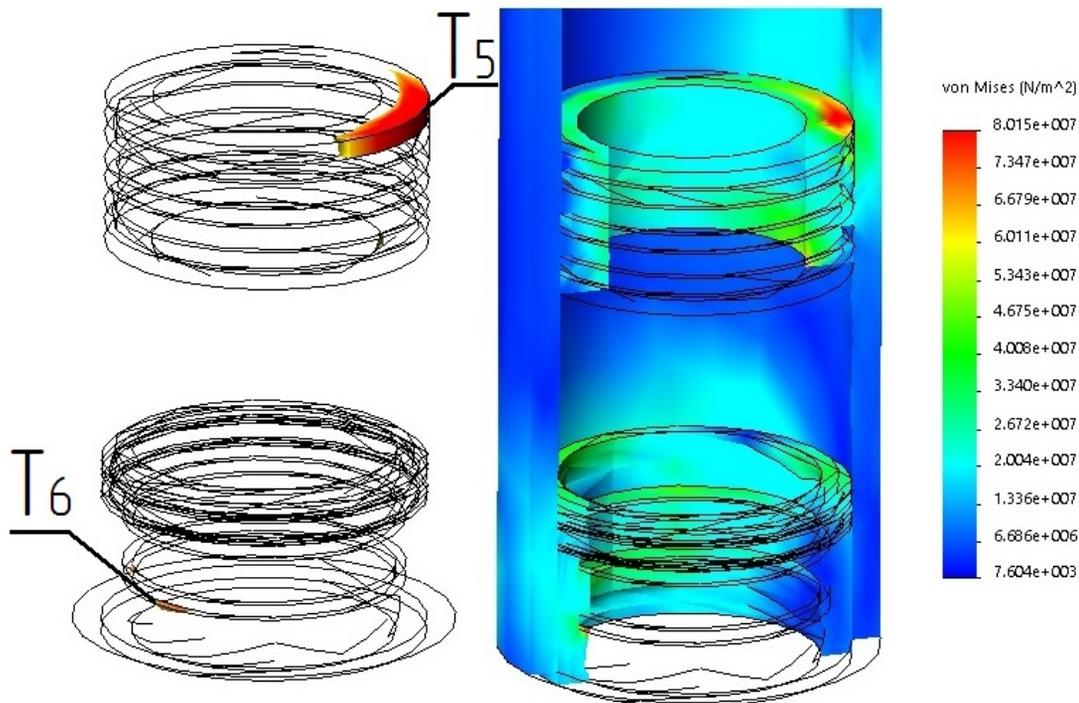


Рисунок 9 – Эпюры напряжений гидроцилиндра третьего варианта контактирования  
\*штоки и другие элементы – скрыты или прозрачны

Figure 9 – Diagrams of stresses of the hydraulic cylinder of the third contact option  
\*stock and other elements – hidden or transparent

Для гидроцилиндра третьего варианта контактирования получены результаты, аналогичные представленным для гидроцилиндра первого и второго варианта контактирования (эпюры вектора контактных напряжений, результирующие горизонтальные силы контакта направляющих поверхностей поршня и втулки и др.).

Изгиб (деформация) штока гидроцилиндра в пространстве возникает в связи с действием поперечных и приложенных с эксцентриситетом продольных нагрузок, создающих изгибающий момент, приложенный к оголовку штока. Деформация штока увеличивается в связи с: перекосом поршня в случае смятия его направляющих и деформации стенок гильзы; деформацией направляющих поверхностей втулки. Зазоры же сочлененных элементов гидроцилиндра приводят к существенному росту несоосности вертикальной оси корпуса гидроцилиндра и продольной оси штока, что вызывает значительное снижение устойчивости гидроцилиндра.

В процессе работы грузоподъемного крана его выносные опорные элементы подвергаются действию переменных нагрузок в зависимости от азимутального положения стрелового оборудования с грузом и от совокупности внешних силовых факторов, таких как неравномерная просадка опорной площадки (например грунтовой) под опорами, высокие инерционные нагрузки и др. [16, 17]. Таким образом, выносные опоры грузоподъемной машины в процессе вращения стрелового оборудования подвержены действию следующих усилий: продольных, которые можно характеризовать как переменные по величине и постоянные по направлению, периодические; поперечных – переменные по величине и направлению, периодические.

Для описанных выше режимов нагружения (см. рисунки 2–9), в случаях действия поперечных нагрузок, меняющих свое направление во времени на противоположные, зоны контакта в соответствии с направлением сил диаметрально изменяются. Следовательно,

элементы гидроцилиндра в этом случае подвергаются циклическому режиму нагружения, который вызывает в отдельных точках трущихся тел переменные контактные напряжения. В случаях же наличия зазоров сопряженных элементов ситуация усугубляется в связи с повышением значения контактных напряжений.

Таким образом, зазоры сочленений ускоряют процесс накопления повреждений элементов гидроцилиндра под действием контактных напряжений, которые приводят к постепенному износу их поверхностей (задиры, царапины, сколы и пр.), уменьшая при этом срок службы гидродвигателя возвратно-поступательного движения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа взаимодействия сопряженных элементов в зависимости от величины зазоров контактных пар опорного силового гидроцилиндра грузоподъемного крана в трехмерной постановке:

- определено НДС конструктивных элементов гидроцилиндра вывешивания в зависимости от геометрических параметров (вариант контактирования сочлененных элементов) и сочетания действующих нагрузок;

- приведены зависимости напряжений контактных зон от величины зазоров и продольной сжимающей нагрузки с учетом действия поперечных сил;

- определены участки максимального нагружения элементов силового гидроцилиндра, рассмотрен процесс формирования контактных зон;

- получены распределения напряжения по объему элементов гидроцилиндра;

- определены силы контакта трущихся поверхностей элементов гидроцилиндра;

- установлено, что увеличение величины зазоров повышает максимальные действующие напряжений элементов сопряжений гидроцилиндра, увеличивает интенсивность изнашивания, способствуя появлению пластических деформации в зонах контакта и повышению интенсивности воздействия тепловых процессов, что неизбежно влечет за собой снижение надёжности работы гидродвигателя возвратно-поступательного движения.

В численных расчетах учтено совместное деформирование следующих конструктивных компонентов гидроцилиндра: поршень, гильза, шток, направляющая втулка, опорно-направляющие кольца.

Результаты проведенного исследования, изложенные в текущей работе, могут быть

использованы для исследования всех типов силовых гидроцилиндров исполнительных органов дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин и оборудования при условии определения параметров численного моделирования, соответствующих рассматриваемым условиям эксплуатации и режимам нагружения конкретного типа техники. В частности, полученные данные могут применяться для определения геометрических форм контактирующих поверхностей и зазоров сопряжений, не приводящих к недопустимым предельным деформациям контактирующих тел (узлов трения) и обеспечивающих надежную работу гидроцилиндра в процессе функционирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кобзов Д.Ю., Ереско С.П. О критериях работоспособности и надёжности гидроцилиндров // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1 (13). С. 38–44.
2. Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Лханаг Д. Несущая способность и ресурс гидроцилиндров машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2 (2). С. 24–28.
3. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 2017. 600 p.
4. Shih R. Introduction to Finite Element Analysis Using SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 2017. 500 p.
5. Ледяев А.П., Быков В.П., Ватулин Я.С., Мигров А.А. Автоматизация исследовательского проектирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 2 (39). С. 165–169.
6. Steinhauser M. O. Computer Simulation in Physics and Engineering, de Gruyter, 2012. 509 p.
7. Kovacevic D. Budaka I. Antic A. Nagode A. Kosec B. FEM modeling and analysis in prevention of the waterway dredgers crane serviceability failure // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 28. P. 328–339.
8. Solazzi L. Feasibility study of hydraulic cylinder subject to high pressure made of aluminum alloy and composite material // Composite Structures. 2019. Vol. 209. P. 739–746.
9. Tomski L., Uzny S., A hydraulic cylinder subjected to Euler's load in aspect of the stability and free vibrations taking into account discrete elastic elements // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 11 (3). P. 769–785.
10. Narvydas E. Buckling strength of hydraulic cylinders-an engineering approach and finite element analysis // Mechanika. 2016. Vol. 22 (6). P. 474–477.
11. Bednarek T., Sosnowski W. Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders – Part II, damage mechanics approach // International Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32 (10). P. 1591–1599
12. Лагерева А.В. Оценка риска при эксплуатации самоходных грузоподъемных кранов стрелового

типа в условиях недостаточной информации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 2. С. 203–220.

13. Collins J. A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, New York, 1993. 654 p.

14. Конев В.В., Закирзаков Г.Г., Мерданов Ш.М., Бородин Д.М. Планирование эксперимента по тепловой подготовке гидродвигателя строительно-дорожных машин // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 6. С. 59–61.

15. Хамидуллина Д.А., Мухтаров Я.С., Кондрашева С.Г. Регрессионный анализ опытных данных при исследовании работы винтовых конвейеров // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 6. С. 140–143.

16. Потахов Е.А., Ватулин Я.С. Разработка математических моделей движения телескопического стрелового оборудования грузоподъемного крана // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2019. № 1 (56). С. 54–62.

17. Ватулин Я. С., Потахов Д. А. Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 1 (58). С. 59–67.

## REFERENCES

1. Kobzov D.Ju., Eresko S.P. O kriterijah rabotosposobnosti i nadjozhnosti gidrocilindrov [On the criteria of operability and reliability of hydraulic cylinders]. *Sistemy. Metody. Tehnologii*. 2012; 1 (13): 38–44 (in Russian).

2. Kobzov D.Ju., Kobzov A.Ju., Lhanag D. Nesushhaja sposobnost' i resurs gidrocilindrov mashin [Bearing capacity and resource of hydraulic cylinders of machines]. *Sistemy. Metody. Tehnologii*. 2009; 2 (2): 24–28 (in Russian).

3. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 2017: 600.

4. Shih R. Introduction to Finite Element Analysis Using SOLIDWORKS Simulation 2017, SDC Publications, 2017: 500.

5. Ledyayev A.P., Bykov V.P., Vatulin Ya.S., Migrov A.A. Avtomatizacija issledovatel'skogo proektirovaniya [Automation of research design]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2014; 2 (39):165–169 (in Russian).

6. Steinhauser M. O. Computer Simulation in Physics and Engineering, de Gruyter, 2012:509.

7. Kovacevic D. Budaka I. Antic A. Nagode A. Kosec B. FEM modeling and analysis in prevention of the waterway dredgers crane serviceability failure. *Engineering Failure Analysis*. 2013; 28: 328–339.

8. Solazzi L. Feasibility study of hydraulic cylinder subject to high pressure made of aluminum alloy and composite material. *Composite Structures*. 2019; 209: 739 - 746.

9. Tomski L., Uzny S., A hydraulic cylinder finally to Euler's load in aspect of the stability and free vibrations

taking into account discrete elastic elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011; 11 (3): 769–785.

10. Narvydas E. Buckling strength of hydraulic cylinders-an engineering approach and finite element analysis. *Mechanika*. 2016; 22 (6): 474–477.

11. Bednarek T., Sosnowski W. Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders - Part II, damage mechanics approach. *International Journal of Fatigue*. 2010; 32 (10):1591–1599.

12. Lageryov A.V. Risk assessment during the operation of self-propelled jib cranes in conditions of insufficient information. *Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University*. 2017; 2: 203–220 (in Russian).

13. Collins J. A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. John Wiley & Sons, New York, 1993: 654.

14. Konev V.V., Zakirzakov G.G., Merdanov Sh.M., Borodin D.M. Planirovanie jeksperimenta po teplovoj podgotovke gidrodvigatelja stroitel'no-dorozhnyh mashin [Planning an experiment on thermal preparation of the hydraulic motor of road construction machinery]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*. 2016; 6: 59–61 (in Russian).

15. Hamidullina D.A., Muhtarov Ja.S., Kondrasheva S.G. Regressionnyj analiz opytnyh dannyh pri issledovanii raboty vintovyh konvejerov [Regression analysis of experimental data in the study of screw conveyors]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013; T. 16. № 6: 140–143. (in Russian).

16. Potahov E.A., Vatulin Ja.S. Razrabotka matematicheskikh modelej dvizhenija teleskopicheskogo strelovogo oborudovaniya gruzopod'emnogo kрана. [Development of mathematical models for the movement of telescopic boom equipment for a crane]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI)*. 2019; 1 (56): 54–62 (in Russian).

17. Vatulin Ja. S., Potahov D. A. Modelirovanie vzaimodejstvija jelementov opornogo kontura zheleznodorozhnogo gruzopod'emnogo kрана s gruntovoj opornoj poverhnost'ju [Modeling the interaction of the elements of the support contour of a railway crane with a ground support surface]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2019;T. 16. № 1 (58); 59–67 (in Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Потахов Денис Александрович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины», ФГБОУ ВО ПГУПС, ORCID 0000-0002-3737-6860 (190031,г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: potakhovd@mail.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Denis A. Potakhov – Postgraduate Student, Department of Lifting and Transport, Track and Construction Machinery, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, ORCID 0000-0002-3737-6860 (190031, St. Petersburg, 9, Moskovskiy Ave., e-mail: potakhovd@mail.ru).

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



## PART II. TRANSPORT

УДК 629.3.07

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ В КОРОБКЕ ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ ТРАКТОРА

**Н.Н. Демидов, А.А. Красильников, С.И. Худорожков**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Процесс переключения передач под нагрузкой является одним из самых сложных видов переходных процессов в трансмиссиях транспортных, дорожных, строительных машин. В настоящее время существующие методики расчетов не отражают в полной мере особенности взаимодействия двигателя с автоматизированной коробкой перемены передач (КПП) при переключении ступеней под нагрузкой с использованием одновременно более двух фрикционных муфт. В данной статье рассматривается методика расчета динамических характеристик КПП с одновременным использованием как двух, так и четырех фрикционных муфт при переключениях передач под нагрузкой при прямом и реверсном включении. Представлены результаты теоретического исследования динамических характеристик автоматизированной КПП с фрикционным переключением ступеней под нагрузкой без разрыва потока мощности.

**Материалы и методы.** В основе рассматриваемой методики лежит системный подход к исследованию динамических процессов, основанный на моделировании работы КПП совместно с двигателем внутреннего сгорания. Особенностью методики является учет регуляторных, скоростных и нагрузочных характеристик двигателя, изменений момента сопротивления, темпа нарастания давления во включаемых муфтах как при переключениях на высшую, так и на низшую передачу. Теоретическое моделирование процессов выполнено с использованием пакета MATLAB и его приложения Simulink. При помощи основных блоков данного приложения создали модели физических компонентов: двигатель внутреннего сгорания, фрикционные муфты сцепления, зубчатые редукторы, упругие валы, демпфирующие устройства, а также системы управления силовой передачей трактора.

**Результаты.** В ходе выполненных исследований получены расчетные данные о характере протекания динамических процессов, изменения оборотов и крутящих моментов на валах КПП, нагрузке на двигатель машины в процессе переключения передач при различных значениях времени начала и окончания процесса включения и выключения фрикционных элементов управления КПП. В работе приведены соответствующие графики.

**Обсуждение и заключение.** Разработанная методика расчета динамических характеристик КПП позволяет моделировать рабочие процессы при переключениях на высшую и низшую передачу. При этом учитываются как параметры конструкции КПП, так и параметры управляющих воздействий – темп включения фрикционных муфт, временные интервалы перекрытия включаемых и выключаемых муфт. Применительно к рассматриваемой КПП определены значения оптимальных временных управляющих команд фрикционных элементов управления при переключении различных передач в КПП.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** коробка перемены передач, колесный трактор, трансмиссия, дорожные и строительные машины, переключение передач, динамические характеристики, фрикционное переключение передач, математическое моделирование, расчетные исследования.

Поступила 27.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Демидов Н.Н., Красильников А.А., Худорожков С.И. Исследование процесса переключения передач в коробке перемены передач трактора. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1):58-71. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71>

© Демидов Н.Н., Красильников А.А., Худорожков С.И.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71>

## TRACTOR GEARBOX: RESEARCH OF SHIFTING GEARS' PROCESSES

**Nikolay N. Demidov, Andrey A. Krasilnikov, Sergey I. Hoodorozhkov**  
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia*

### ABSTRACT

**Introduction.** The process of shifting gears under load is one of the most complex types of dynamic process in the transmissions of transport, road and construction vehicles. Currently, the existing calculation methods do not fully reflect the features of the engine and automated gearbox interaction by switching stages under load using more than two friction clutches at the same time. The paper discusses the method of calculating the dynamic characteristics of the gearbox with the simultaneous use of both two and four friction clutches by shifting gears under load with forward and reverse switching. The authors present the results of the dynamic characteristics of the theoretical study of the automated gearbox with frictional stages' switching under load and without breaking the power flow.

**Materials and methods.** The main method was based on a system approach to the dynamic processes study and on the modeling of the gearbox operation together with the internal combustion engine. The authors took into account the regulatory, speed and load engine characteristics, resistive torque variation, rate of pressure rise in clutches by shifting to higher and lower gears. The paper performed theoretical modeling of processes using the MATLAB package and the Simulink application. Using the main blocks of this application, the authors created models of physical components: an internal combustion engine, friction clutches, gear reducers, elastic shafts, damping devices and tractor power transmission control systems.

**Results.** As a result, the authors obtained calculated data of the dynamic processes, variations in speed and rotational torque on the gearbox shafts; the load on the engine by shifting gears at different values of the start and finish time in switching on and off the gearbox friction controls. The paper presented the relevant graphs of the processes.

**Discussion and conclusions.** The developed method of calculating the dynamic characteristics of the gearbox allows simulating workflows by shifting to higher and lower gears. This method takes into account both the parameters of the gearbox design and of the control actions: the rate of switching on the friction clutches; the time intervals of overlapping the "on and off" clutches. Therefore, in relation to the considered gearbox, the authors determine the values of the optimal time control commands of the friction by shifting.

**KEYWORDS:** gearbox, wheel tractor, transmission, road and construction vehicles, gear shifting, dynamic characteristics, friction gear shifting, mathematical modeling, computational research.

**Submitted 27.10.2019, revised 21.02.2020.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

*For citation:* Nikolay N. Demidov, Andrey A. Krasilnikov, Sergey I. Hoodorozhkov. Tractor gearbox: research of shifting gears' processes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):58-71. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71>

© Demidov N. N., Krasilnikov A. A., Hoodorozhkov S. I.



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

**ВВЕДЕНИЕ**

Тема данного исследования связана с разработкой коробки перемены передач (КПП), предназначенной для применения в составе перспективных колесных сельскохозяйственных и промышленных тракторов, дорожной строительной техники. В данном случае рассматривается КПП, которая имеет два диапазона автоматизированного переключения пе-

редач (с 1-й по 8-ю и с 9-й по 16-ю). При этом в предлагаемой КПП, кинематическая схема которой представлена на рисунке 1, переключение с 4-й на 5-ю ступени и обратно (а также с 12-й на 13-ю) выполняется с одновременным переключением 4-х фрикционных муфт, расположенных на входном и грузовом валах КПП, а не двух фрикционных муфт, как это происходит при переключениях с 1-й по 4-ю и с 5-й по 8-ю, с 9-й по 12-ю, с 13-й по 16-ю.

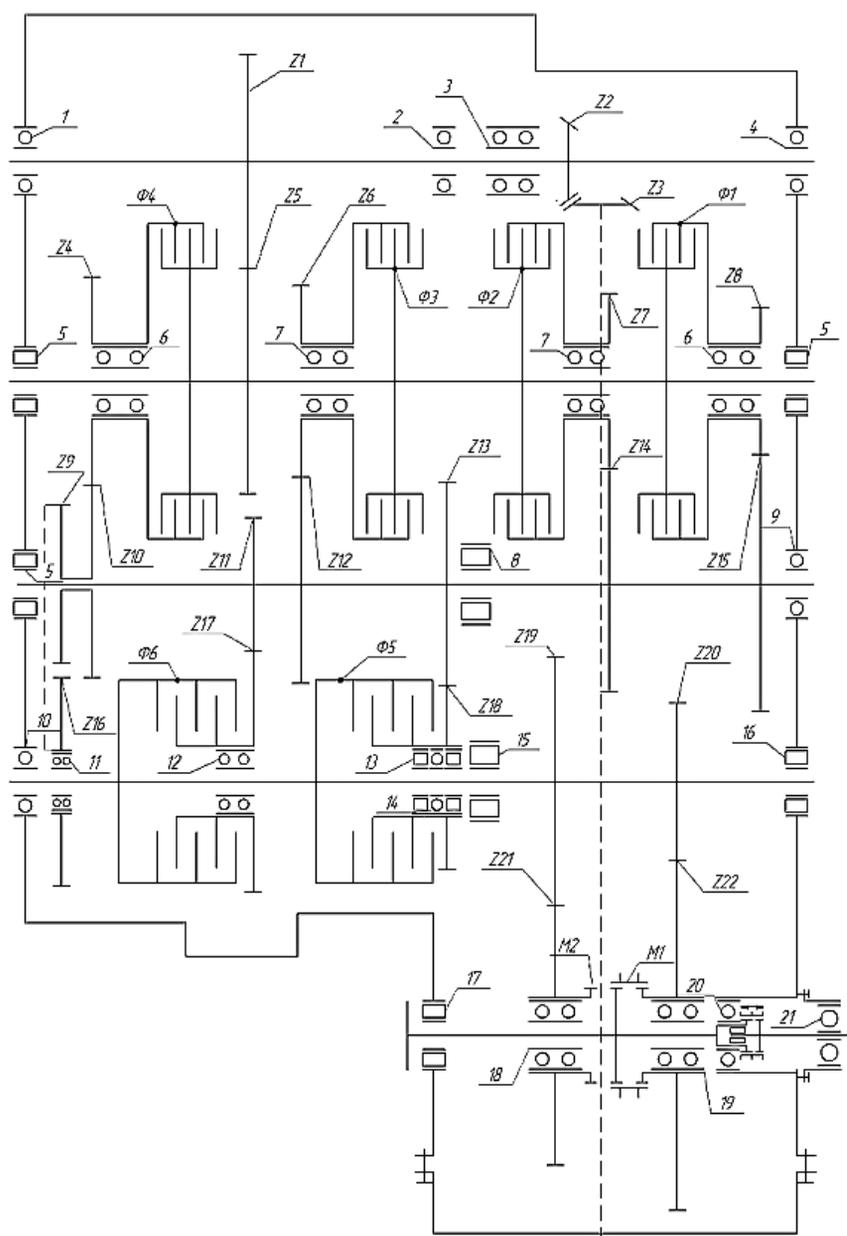


Рисунок 1 – Кинематическая схема коробки передач трактора: φ1...φ6 – фрикционные муфты, z1...z23 – зубчатые колеса, 1...21 – подшипники

Figure 1 – Kinematic scheme of tractor gearbox: F1...F6 – friction clutches, z1...z23 – gears, 1... 21 – bearings

Процесс переключения передач под нагрузкой является одним из самых сложных видов переходных процессов в трансмиссиях транспортных и тяговых машин. В настоящее время существующие методики расчетов не отражают в полной мере особенности взаимодействия двигателя с автоматизированной КПП при переключении передач под нагрузкой с использованием одновременно более двух фрикционных муфт.

В ряде работ<sup>1</sup> [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] приводятся описания структур, особенностей автоматизированных систем управления силовым приводом транспортных средств, систем управления силовой установкой, подачей топлива (в частности системы PowerTrain Management (PTM), ETC). В работах<sup>2, 3, 4</sup> [9] описаны примеры конструктивных изменений в трансмиссиях зарубежных и отечественных промышленных и сельскохозяйственных тракторов повышение мощности, приведены основные режимы их работы. Рассматривается применение на тракторах механизмов переключения передач под нагрузкой, даны методики расчета, обобщены результаты испытаний тракторов отечественного и зарубежного производства. Практические рекомендации по проектированию КПП (и их систем управления) предложены для конструкций КПП, где при переключении передач приведены одновременно и используются две фрикционные муфты. Эти вопросы рассматриваются в работах [10, 11, 12, 13, 14].

Вопросы управления переключением передач затрагиваются в работах [15, 16, 17, 18], однако здесь присутствуют теоретические и экспериментальные данные по рабочим процессам одновременного переключения только двух, а не четырех фрикционных муфт, как в предлагаемой работе. Кроме того, не учитывается переменность коэффициента трения на поверхностях фрикционных дисков.

В работах [4, 15] отмечается тенденция к увеличению числа передач в автоматических трансмиссиях. При этом вопросы управления переключением передач приобретают все большее значение. С другой сто-

роны, экономия веса и уменьшение размеров трансмиссии, включая гидравлический блок управления, настоятельно необходимы для повышения эффективности использования топлива. Разработка оптимальных стратегий и алгоритмов управления многоступенчатыми автоматическими коробками передач с электрогидравлической системой управления может обеспечить получение высоких тяговых и экономических показателей машины в целом. В ряде работ [19, 20, 21, 22] излагаются математические и экспериментальные методы исследования динамических процессов в тракторах, трогание и разгон трактора. Предлагаются математические модели и инженерные методы расчета процесса трогания и движения машинно-тракторного агрегата.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев отсутствуют математические модели, позволяющие анализировать процесс переключения передач КПП с автоматизированным переключением. Приведенные в отдельных работах алгоритмы управления процессом переключения передач являются закрытыми и не могут быть рассмотрены применительно к тракторной технике.

Предлагаемая методика имеет целью рассчитывать динамические характеристики КПП с одновременным использованием как двух, так и четырех фрикционных муфт при переключениях передач под нагрузкой при прямом и реверсном включении.

Дополнительно методика включает системный подход к исследованию динамических процессов при переключении, основанный на моделировании работы КПП совместно с двигателем внутреннего сгорания (с учетом его динамических, скоростных и нагрузочных характеристик).

Основной задачей динамических расчетов является обоснование рациональных режимов перекрытия при одновременных переключениях двух и четырех фрикционных муфт под нагрузкой, при этом под перекрытием понимаются интервалы одновременного включения и выключения фрикционных муфт. Недостаточ-

<sup>1</sup> Leigh A., Ronald J. Control Theory. Institution of Electrical Engineers. 2004. 303 p.

<sup>2</sup> Поршнев Г.П. Проектирование автомобилей и тракторов. Конструирование и расчет трансмиссий колесных и гусеничных машин : учебное пособие. СПб. : издательство Политехнического университета, 2017. 64 с.

<sup>3</sup> Бойков А.В., Шувалов Е.А., Добряков Б.А., Теория и расчет трактора «Кировец». Л. : Машиностроение, Лен. отд., 1980. 208 с.

<sup>4</sup> Кочнев А.М. Рабочие режимы отечественных колесных трелевочных тракторов. СПб. : издательство Политехнического университета, 2008. 520 с.

ное перекрытие приводит к потере скорости трактора во время переключения, появлению возможности его остановки, а избыточное – к увеличению работы буксования фрикционных муфт и возрастанию динамических нагрузок в трансмиссии и тракторном агрегате.

Особенностью методики является учет момента сопротивления, темпа нарастания момента трения во включаемых муфтах при переключениях как на высшую, так и на низшую передачу. При этом рассматривается совместная работа двигателя с учетом его регуляторных характеристик.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В основе теоретических методов исследования принято использование пакета MATLAB и его приложения Simulink. При помощи фундаментальных блоков этих приложений можно создать модели физических компонентов, таких как двигатель внутреннего сгорания, фрикционная муфта сцепления, зубчатый редуктор, упругие валы, демпфирующие устройства, а также системы управления силовой передачей трактора.

Модель механической системы коробки передач трактора представлена на рисунке 2. На рисунке входной вал коробки передач представлен в виде участков, соединенных на входе с портом “Engine”, а на выходе с подсистемами “F\_1, F\_2, F\_3, F\_4”, представляющих собой фрикционные узлы.

Редукторные свойства данных узлов описываются с помощью четырех блоков “Simple Gear”: Gear\_1.71, Gear\_1.41, Gear\_1.17, Gear\_0.97. Инерционные свойства ведущих масс (на входном валу) и ведомых масс (на

промежуточном валу) представлены инерционными вращающимися массами “Inertia”: Inertia1-Inertia2; ...; Inertia7-Inertia8. Подшипниковые опоры входного вала представлены двумя вращательными диссипативными блоками “Rotational Damper” с вращающимися опорами “Mechanical Rotational Reference”: D\_F1 и D\_F2.

Промежуточный вал коробки передач моделируется аналогичными типовыми элементами с учетом некоторых конструктивных отличий. Вал разбит на участки (по точкам установки ведомых масс, находящихся в зацеплении с входным валом, и ведущих масс, находящихся в зацеплении с грузовым валом).

Редукторные свойства промежуточного вала описываются с помощью двух блоков: M\_1.74 и M\_0.83. Инерционные свойства ведущих масс (на промежуточном валу) и ведомых масс (на грузовом валу) представлены блоками: Inertia9 - Inertia10; Inertia11- Inertia12. Фрикционные муфты, обеспечивающие переключение режимов, смоделированы в виде подсистем “F6, F5”. Подшипниковые опоры промежуточного вала представлены двумя вращательными диссипативными блоками с вращающимися опорами: D\_F3 и D\_F4. Вращающиеся ведомые массы фрикционов F5 и F6 представлены блоком “Inertia13”. Редукторные свойства между грузовым и раздаточным валом описываются с помощью блока M\_2.43. Раздаточный вал “Transfer Shift” представлен участком, соединенным с выходным портом “Load”. Подшипниковые опоры раздаточного вала представлены двумя вращательными диссипативными блоками с вращающимися опорами: D\_F\_5 и D\_F\_6.

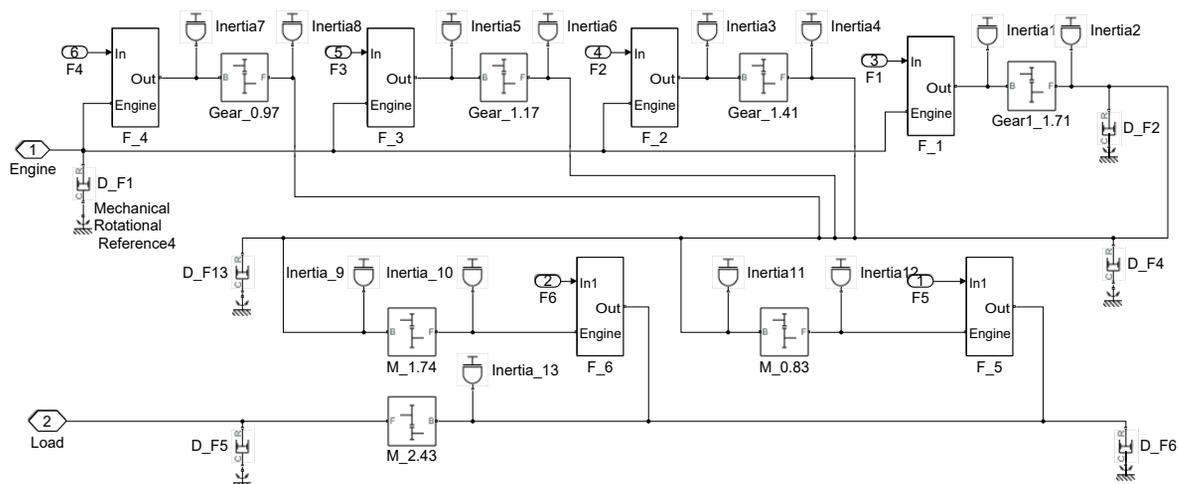


Рисунок 2 – Модель механической системы КПП

Figure 2 – Model of the mechanical gearbox system

Подсистемы «фрикционный узел»  $F_1, \dots, F_6$  представляют собой однотипные блок-схемы с заданными параметрами.

Рассмотренная выше модель механической системы КПП включает в себя следующие типовые блоки:

- типовой блок “Disk Friction Clutch”, представляющий собой фрикционную муфту с наборами фрикционных дисков. Муфта двунаправленная и может скользить в положительном и отрицательном направлениях. Блок обеспечивает входной порт физического сигнала (P) для приложенного давления к дискам трения;

- типовой блок “Inertia”, представляющий собой идеальную механическую вращательную инерцию, в окно параметров которого заносятся значения моментов инерции вращающихся масс коробки передач, принятых в модели КПП;

- типовой блок “Simple Gear”, представляющий собой зубчатую пару с фиксированным передаточным числом. Передаточное число рассчитывается как отношение чисел зубьев ведомого колеса (порт F) к ведущему (порт B) –  $(NF/NB)$ . При создании расчетной модели в окно параметров блока вводятся передаточные числа зубчатых передач КПП.

В целом вся обобщенная модель работы КПП совместно с двигателем трактора при переключениях передач включает в себя блок управления “Control”, блок двигателя “Engine”, блок коробки передач “Transmission”, блок нагружающего устройства “Load” и блок визуализации результатов расчетов “Monitor”.

Подсистема управления “Control” формирует управляющие воздействия на фрикционные узлы  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$  коробки передач. Блок двигателя “Engine” задает режим работы двигателя в соответствии с параметром внешней и регуляторными характеристикам двигателя. Подсистема “Load” формирует нагрузки на выходном валу коробки передач с помощью блока “Signal Builder”, соответствующие режиму постоянного момента сопротивления или постоянной мощности.

Данная расчетная модель механической системы КПП с двигателем позволяет моделировать процесс переключения передач в КПП, задавая различные законы управления процессом переключения с различными временными характеристиками.

В качестве примера на рисунке 3 представлен вид управляющих воздействий при переключении вверх с 1-й по 6-ю, а затем вниз – с 6-й по 4-ю передачу.

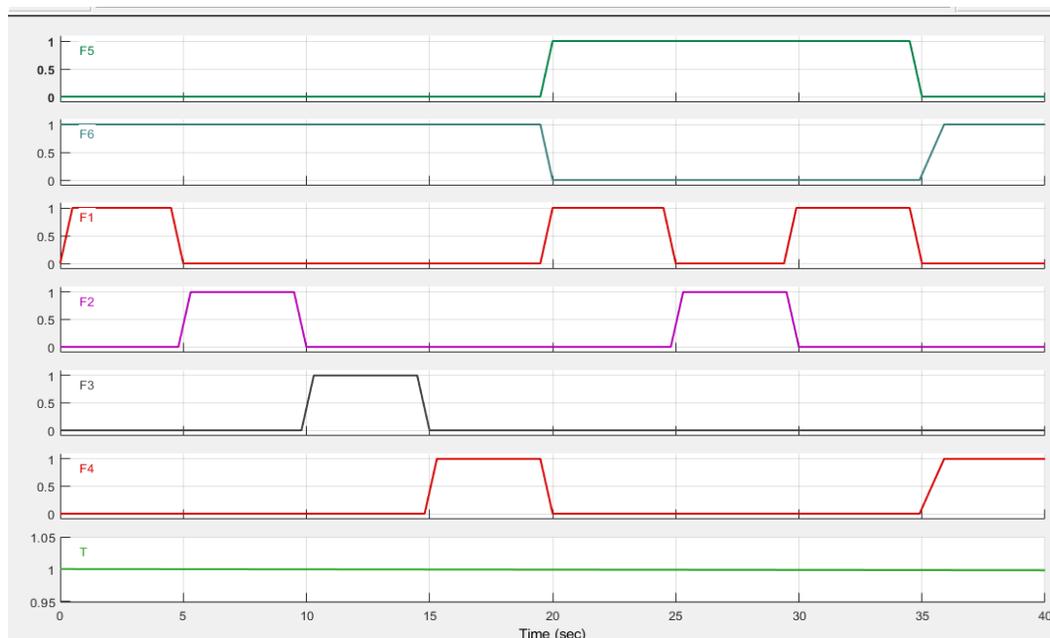


Рисунок 3 – Сигналы управляющих воздействий на фрикционы КПП ( $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ ) и подачи топлива в двигатель ( $T$ ) при моделировании трогания с места и разгона с переключением вверх с 1-й по 6-ю и вниз с 6-й по 4-ю передачу

Figure 3 – Signals of control actions on the gearbox clutches ( $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ ) and fuel supply to the engine ( $T$ ) while modeling starting and acceleration by switching up from the 1st to the 6<sup>th</sup> and down from the 6th to the 4th gear

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 4 в качестве примера представлены расчетные кривые оборотов двигателя и крутящего момента при последовательном переключении передач вверх с 1-й по 6-ю и вниз с 6-й по 4-ю при постоянном моменте сопротивления на выходном валу АКПП 1660 Нм. Графики с расчетными кривыми показывают, как изменяется в процессе трогания с места и разгона частота вращения коленчатого вала двигателя (верхняя кривая) и крутящий момент двигателя (нижняя кривая) в интервале времени от 0 до 40 сек.

При трогании с места фрикционная муфта F6 предварительно включена под давлением 0,9 МПа, а фрикционная муфта Ф1 включается по линейному закону нарастания давления с 0 до 0,9 МПа в течение 0,5 сек. Динамический процесс с включением одной фрикционной муфты хорошо изучен и не требует дополнительных исследований. Вопрос рассматривается в частности в работах В.П. Тарасика, В.М. Шарипова. Отметим только совместную работу двигателя и трансмиссии. Во время первого периода разгона момент трения муфты F1 является для коленчатого вала моментом сопротивления, а для входного вала КП – ведущим моментом.

По сигналу обратной связи, реагирующему на снижение частоты вращения коленчатого

вала при возрастании момента трения муфты M1, двигатель переходит с регуляторной на безрегуляторную характеристику. В результате снижаются обороты двигателя с 2200 до 1760 об/мин, и повышается крутящий момент двигателя со значения крутящего момента холостого хода до 796 Н·м.

Рассмотрим режим переключения с первой на вторую передачи с помощью двух фрикционных муфт (рисунок 5) при постоянном моменте сопротивления на выходном валу. Длительность перекрытия фрикционных при переключении принимается равной 0,1 сек, так как с учетом принятых начальных условий моделирования такое перекрытие соответствует моменту достижения в муфте F2 величины момента трения, равного приведенному моменту сопротивления на входе КП (оптимальное перекрытие).

До начала переключения весь вращающий момент двигателя передается фрикционными F1 (F6), т.е. момент двигателя равен вращающему моменту на фрикционе F1. Двигатель работает на регуляторной ветви характеристики.

На первом этапе процесса переключения передачи происходит включение муфты F2 при еще включенной муфте F1. Далее начинается выключение фрикциона F1. При этом вращающий момент M1 линейно снижается до нуля.

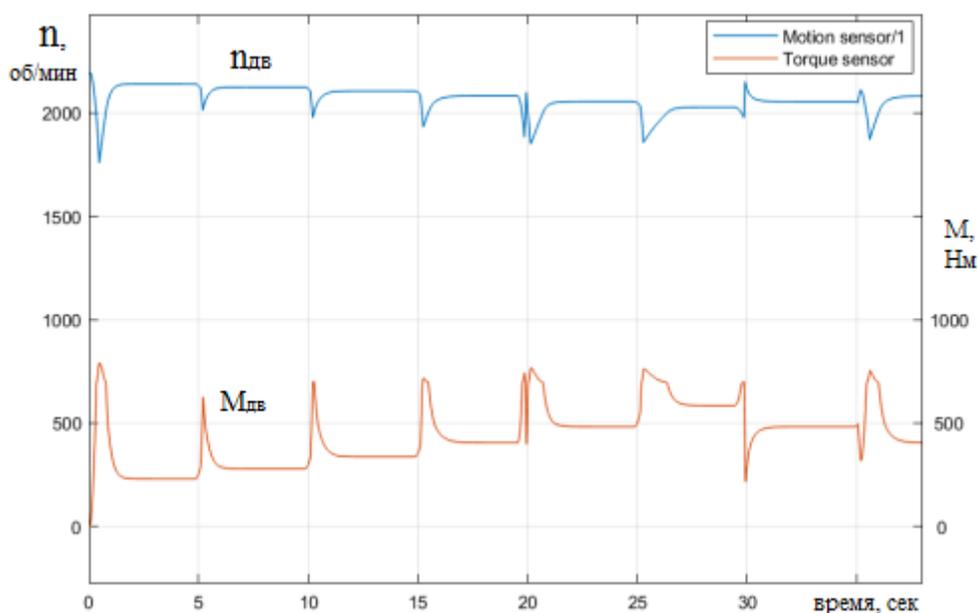


Рисунок 4 – Расчетные кривые изменения частоты вращения двигателя (об/мин, верхний) и крутящего момента (Нм, нижний) при последовательном переключении передач вверх (с 1-й по 6-ю) и вниз (с 6-й на 4-ю) при постоянном моменте сопротивления 1660 Нм

Figure 4 – Calculated curves of changes in engine speed (rpm, upper) and torque (Nm, lower) during sequential gear changes up (from the 1<sup>st</sup> to the 6<sup>th</sup>) and down (from the 6<sup>th</sup> to the 4<sup>th</sup>) at a constant resistance torque of 1660 Nm

Еще включенная первая передача в этот период воспринимает на себя часть нагрузки, часть момента  $M_c$ . Частоты вращения ведущих и ведомых  $\omega_1$  частей муфты F1 в этот период остаются равными. В процессе включения фрикциона F2 происходит линейное возрастание передаваемого крутящего момента M2, который оказывает тормозящее действие, тем самым увеличивая крутящий момент на коленчатом валу двигателя с 270 до 620 Нм и снижая частоту вращения коленчатого вала двигателя с 2120 до 2020 об/мин.

Вращающий момент включаемого фрикциона F2 стремится преодолеть момент сопротивления и сорвать выключаемый фрикцион F1, преодолев его момент трения. После срыва фрикциона F1 (при  $t \approx 5,08$  сек) момент трения муфты F2 продолжает возрастать до достижения максимального значения. При этом под действием свободного избыточного момента ускоряется вращение ведомых масс F2 вплоть до синхронизации ведущих и

ведомых дисков включаемого фрикциона F2 (при  $t \approx 5,25$  сек).

Передача вращающего момента в этот период протекает с буксованием дисков фрикциона F2, а момент трения M2 превышает момент сопротивления  $M_c$ . Процесс заканчивается при синхронизации скоростей ведущих и ведомых масс. При этом поскольку для преодоления момента трения фрикционной муфты F2 используется также инерционный момент движущихся масс, то рост крутящего момента двигателя  $M_{дв}$  отстает от роста момента трения фрикционной муфты M2. Окончание процесса синхронизации характеризуется резким, теоретически мгновенным снижением крутящего момента в муфте F2 до величины приведенного момента сопротивления на входе.

Последующий период (2-й этап) перехода к установившемуся движению после окончания буксования муфты F2 подобен процессу трогания с места и разгона с использованием одной фрикционной муфты.

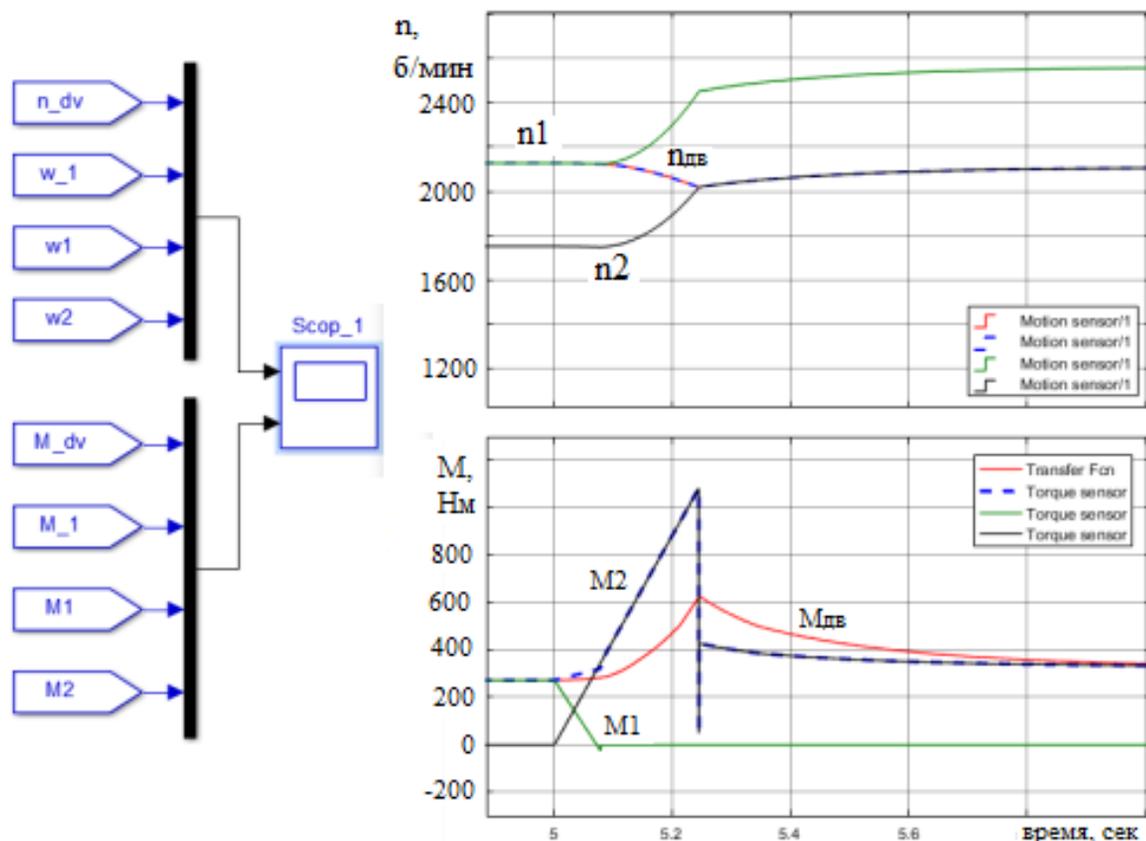


Рисунок 5 – Расчетные кривые изменения частоты вращения и крутящего момента на входном валу при переключении с 1-й на 2-ю передачу (момент на выходном валу 2000 Нм)

Figure 5 – Calculated curves of changing speed and torque on the input shaft during switching from the 1<sup>st</sup> to the 2<sup>nd</sup> gear (output shaft torque is 2000 Nm)

Процесс переключения передачи заканчивается, когда приведенный момент трения муфты F2 достигает значения, равного приведенному моменту сопротивления на входе. К концу данного этапа муфта F2 развивает момент, достаточный для преодоления сопротивления движению при работе второй передачи. Выключение муфты F1 не приводит к снижению скорости выходного вала, поэтому с точки зрения обеспечения безразрывности потока мощности дальнейшая совместная работа двух передач становится нецелесообразной. Излишнее перекрытие сопряжено с возникновением циркуляции мощности, увеличением буксования муфт и др. Таким образом, оптимальная длительность перекрытия равна времени увеличения момента трения муфты F2 от 0 до значения, равного приведенному моменту сопротивления.

Таким образом, оптимальное перекрытие характеризуется передачей мощности двигателя к ведомому валу двумя параллельными потоками через передачи 1 и 2, отсутствием циркуляции мощности. Качественно аналогичные процессы происходят при переключениях со 2-й на 3-ю, с 3-й на 4-ю передачу, а также с 5-й на 6-ю, с 6-й на 7-ю и с 7-й на 8-ю передачу.

Несколько иначе происходит процесс переключения с 4-й на 5-ю передачу (и с 12-й на 13-ю), где одновременно задействованы четыре фрикционные муфты (две включаются и две выключаются).

Рассматриваемая расчетная методика позволила провести моделирование процесса переключения передач с одновременной работой четырех фрикционных муфт с различными значениями времени перекрытия выключаемых и включаемых фрикционов. При этом возможно получить расчетную оценку влияния времени перекрытий муфт на параметры циркуляции мощности внутри КПП, изменения тягового момента и оборотов на выходе КПП. На основании этих данных можно определять оптимальные параметры алгоритма управления работой фрикционных муфт (время включения/выключения соответствующей муфты при переключениях передач в КПП).

Процесс переключения с 4-й на 5-ю передачу при длительности перекрытия муфт 0,3 сек происходит следующим образом.

В начале процесса весь вращающий момент двигателя передается фрикционными F4 и F6, т.е. момент двигателя Mдв равен вращающему моменту на фрикционе F4. Двигатель работает на регуляторной ветви характеристики. На рисунке 6 приведены графики

изменения крутящих моментов и оборотов на входном и грузовом валах КПП. На входном валу (рисунок 6, а) при переключении на 5-ю передачу, соответствующую более высокой скорости движения, фрикцион F1 включается в работу и вращающий момент M1 начинает увеличиваться, но в отрицательном направлении, поскольку частота вращения ведомых масс фрикциона  $\omega_1$  больше частоты вращения двигателя пдв и, соответственно, ведущих масс фрикциона  $\omega_4$ .

При этом скорость  $\omega_1$  ведущих масс фрикциона F1, равная пдв, увеличивается, а ведомых масс – снижается. Процесс переключения с обратной зеркальностью подобен ранее рассмотренному режиму переключения с первой на вторую передачу, когда частота вращения ведущих масс включаемой муфты превышает частоту вращения ведомых масс. Такая обратная зеркальность сохраняется до конца буксования фрикциона F1 и выравнивания скоростей ведущих и ведомых масс фрикциона при  $t \approx 20,18$  сек.

Отрицательный вращающий момент включаемого фрикциона F1 стремится преодолеть момент сопротивления и сорвать выключаемый фрикцион F4, преодолев его момент трения. Поэтому в начальный момент выключения фрикциона F4 момент M4 кратковременно возрастает, а затем срывается и падает до нуля.

После срыва выключаемого фрикциона F4 ( $t = 20,04$ ) идет процесс буксования ее дисков трения, заканчивающийся при  $t = 20,1$  сек. До полного выключения фрикциона F4 происходит циркуляция мощности в кинематическом контуре между фрикционами F1 и F4 (в интервале времени 20,04...20,1 сек). После выключения фрикциона F4 прекращается циркуляция мощности и ускоряется разгон ведомых масс фрикциона F1 до синхронизации частот ведущих и ведомых дисков при  $t = 20,18$  сек.

После синхронизации скоростей и окончания буксования фрикциона F1, момент трения M1 данного фрикциона резко меняет знак, увеличивая нагрузку на двигатель. При этом он превосходит момент двигателя Mдв (до момента времени  $t = 20,4$  сек), поэтому частота вращения входного вала пдв (и  $\omega_1$ ) снижается и двигатель переходит на безрегуляторную ветвь характеристики.

В дальнейшем момент трения M1 фрикционной муфты F1 продолжает расти, т.к. продолжает увеличиваться момент трения во фрикционе F5. Рост моментов прекращается после синхронизации частот вращения ведущих и ведомых масс муфты F5 (при  $t = 20,4$  сек).

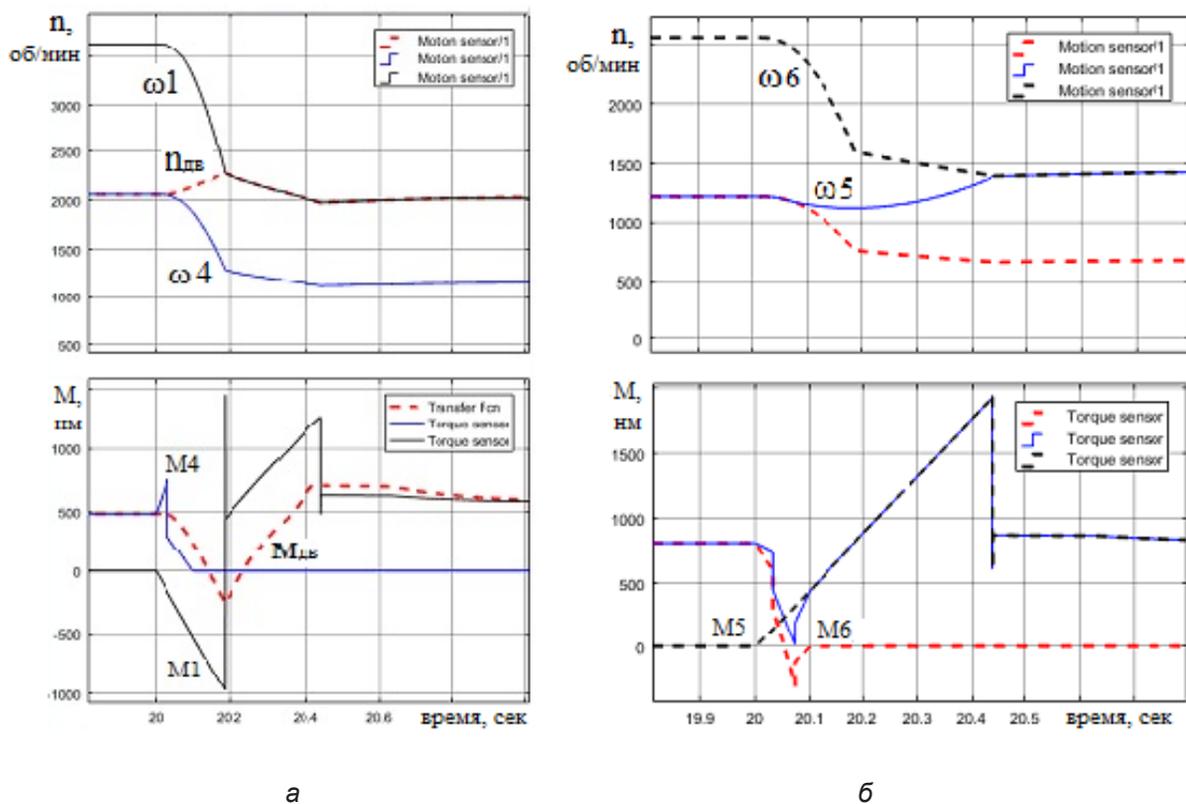


Рисунок 6 – Расчетные кривые изменения оборотов и крутящих моментов при переключении с четвертой на пятую передачу на входном валу (а) и грузовом валу (б) КПП

Figure 6 – Calculated curves of changing speed and torque during switching from the 4<sup>th</sup> to the 5<sup>th</sup> gear on the input shaft (a) and on the load shaft (b)

Крутящие моменты во фрикционах F5 и F1 при этом резко снижаются до значений, равных приведенным моментам сопротивления на соответствующих валах.

В последующем момент двигателя  $M_{дв}$ , превышая приведенный момент сопротивления, разгоняет входной вал, а после выравнивания с моментом сопротивления при  $t = 21,5$  сек, возвращается на стационарный режим работы (см. рисунок 6, а) с крутящим моментом 570 Нм при частоте вращения 2030 об/мин.

На грузовом валу до начала переключения на 5-ю передачу весь вращающий момент передается фрикционом F6 (рисунок 6, б). При включении фрикциона F5 в работу момент трения  $M_5$  резко увеличивается от нуля до 1900 Нм в положительном направлении. Вращающий момент включаемого фрикциона F5 стремится преодолеть момент сопротивления и сорвать выключаемый фрикцион F6, преодолев его момент трения.

При этом выключение фрикциона F6 сопровождается кратковременным снижением момента трения  $M_6$  в области отрицатель-

ных значений и созданием кратковременного тормозящего действия на включение фрикциона F5, поскольку такое тормозящее воздействие оказывает фрикцион F4 на входном валу. Затем момент трения  $M_6$  обращается в ноль.

После срыва выключаемого фрикциона F6 его ведущие диски начинают вращаться с меньшей частотой, чем ведомые. До полного выключения фрикциона F6 происходит циркуляция мощности в кинематическом контуре между фрикционами F6 и F5.

После полного выключения фрикциона F6 при  $t = 20,1$  сек ускоряется вращение его ведомых масс до синхронизации ведущих и ведомых дисков включаемого фрикциона F5 (при  $t = 20,44$  сек). Передача вращающего момента при этом протекает с буксованием муфты F5, заканчивающимся после синхронизации скоростей ее ведущих и ведомых частей  $\omega_5$  и  $\omega_7$ . Во время последующего периода разгона при  $t > 20,44$  муфта F5 не буксует. По окончании разгона двигатель переходит на стационарный режим.

Качественно процесс выключения фрикциона F6 и включения фрикциона F5 аналогичен процессам переключения во фрикционах с 1-й по 4-ю и с 5-й по 8-ю передачу, т.к. в этих случаях при включении соответствующей передачи ведущие массы фрикционных муфт имеют большую скорость, чем ведомые. Отличие заключается в том, что скорость ведущих масс муфты F5 определяется характером протекания процесса включения фрикциона F1, что следует из вида кривой  $\omega_5$  (см. рисунок 6, б), которая имеет характерный излом при  $t = 20,18$ , соответствующий моменту окончания буксования муфты F1. При этом процесс буксования фрикциона F5 имеет большую продолжительность, чем фрикциона F1.

Снижение частоты вращения ведомого вала с 1200 до 1100 об/мин в период с 20,05 до 20,2 сек связано с тем, что в этот период момент трения муфты F5 меньше приведенного момента сопротивления на грузовом валу, что приводит к кратковременному снижению мощности на выходном валу.

При дальнейшем росте момента M5 частота вращения ведомого вала  $\omega_5$  возрастает.

Длительность перекрытий в работе выключаемых и включаемых фрикционных муфт оказывает существенное влияние на процесс переключения передач. На рисунке 7 приведены графики изменений крутящего момента и оборотов двигателя при различных значениях перекрытий фрикционных муфт.

Здесь видно, что при перекрытии 0,1 сек отрицательный момент трения фрикционной муфты F1 приводит к снижению момента двигателя Mдв вплоть до кратковременного перехода в отрицательную зону с увеличением оборотов двигателя  $n_{дв}$  с 2050 до 2260 об/мин (режим торможения двигателем). Процесс переключения при этом сопровождается повышенной динамикой.

Увеличение перекрытия более 0,3 сек в период включения и выключения муфт F6 и F5 приводит к увеличению буксования фрикциона F6, циркуляции мощности в узле F5, F6 в период с 19,95 до 20,1 сек, снижению разгрузки двигателя и практически устранению падения оборотов выходного вала АКПП.

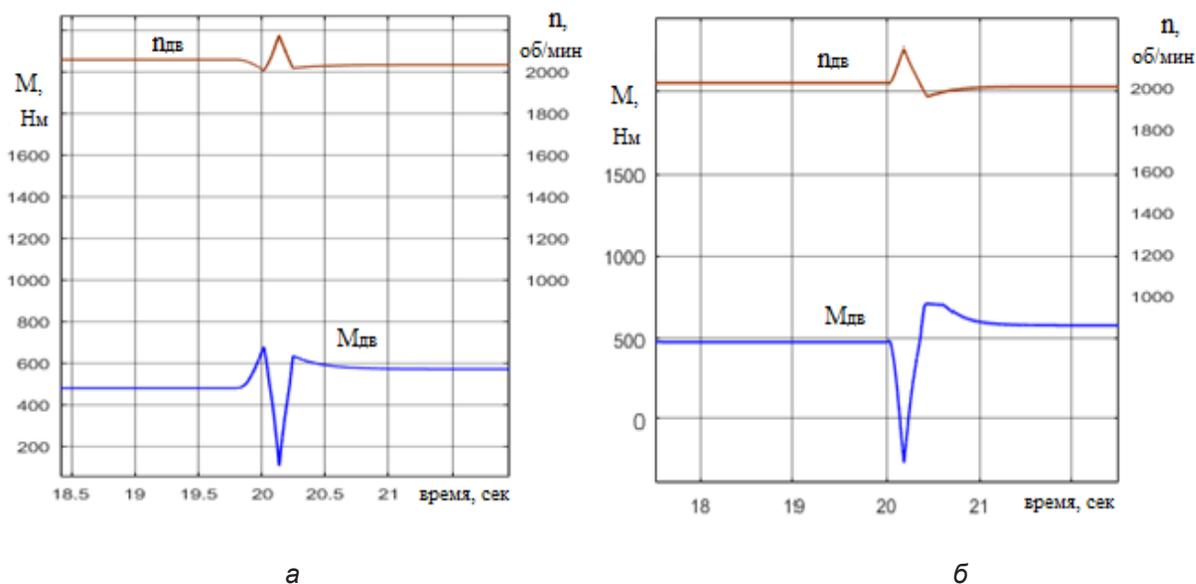


Рисунок 7 – Расчетные кривые изменения крутящего момента и оборотов двигателя при переключении с 4-й на 5-ю передачу с перекрытием: 0,3 сек (а) и 0,1 сек (б)

Figure 7 – Calculated curves of changing engine torque and engine speed during switching from the 4<sup>th</sup> to the 5<sup>th</sup> gear with the 0,3 sec (a) and 0,1 sec (b) overlap

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная методика расчета динамических характеристик КПП позволяет моделировать рабочие процессы при переключении на высшую и низшую передачу. При этом учитываются как параметры конструкции КПП (моменты инерции деталей, передаточные числа зубчатых передач, число дисков трения фрикционных муфт, коэффициенты трения покоя и скольжения), так и параметры управляющих воздействий (момент сопротивления, момент двигателя, подача топлива, темп включения фрикционных муфт, интервалы перекрытия включаемых и выключаемых муфт).

2. Применительно к рассмотренной КПП при темпе включения-выключения фрикционных муфт 0,5 сек, оптимальное значение перекрытия на передачах с 1-й по 4-ю и с 5-й по 8-ю (переключение с помощью двух фрикционных муфт) составляет 0,1–0,15 сек при номинальной мощности. Увеличение перекрытия более 0,2 сек при номинальной передаваемой мощности приводит к увеличению продолжительности буксования обеих муфт и росту циркулирующей мощности в контурах переключаемых передач. Уменьшение значения перекрытия менее 0,1 сек приводит к возникновению провалов мощности на выходном валу коробки при переключениях передач.

3. При сохранении рациональных параметров перекрытия муфт F1-F4 рациональное перекрытие муфт F6-F5, при переключении с 4-й на 5-ю ступени коробки передач, составляет 0,25–0,3 сек при номинальной передаваемой мощности (переключение с помощью четырех фрикционных муфт). Уменьшение перекрытия муфт F6-F5 меньше 0,25 сек способствует появлению и увеличению провалов мощности и скачков оборотов двигателя при переключениях с 4-й на 5-ю передачу. Увеличение перекрытия муфт F6-F5 свыше 0,3 сек способствует увеличению избыточных (паразитных) моментов на грузовом валу, циркуляции мощности в этом контуре и дополнительному нагружению входного вала и двигателя.

4. Процесс включения понижающей передачи с помощью двух фрикционных муфт, при перекрытии муфт F1...F4 равным 0,1–0,15 сек, сопровождается кратковременным незначительным провалом мощности на выходном валу и скачком оборотов двигателя при номинальной передаваемой мощности.

5. Процесс включения понижающей передачи с помощью четырех фрикционных муфт, при перекрытии 0,25–0,3 сек муфт F5...F6, сопровождается незначительным кратковре-

менным снижением мощности и увеличением оборотов двигателя. С уменьшением нагрузки на выходном валу снижение мощности и увеличение оборотов двигателя в процессе переключения увеличивается.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kuwahara S., Kubonoya H., Mizuno H., Kaigawa M., and Kono K., Toyota's New Integrated Drive Power Control System // SAE Paper. 2007. No. 2007-01-1306, SAE International, Warrendale, PA.
2. Bai Shushan, Brennan D., Dusenberry D., Tao X., and Zhen Zhang, Integrated Powertrain Control // SAE Paper. 2010. No. 2010-01-0368, SAE International, Warrendale, PA.
3. Kim D., Peng H., Bai S., and Maguire J. Control of Integrated Power train With Electronic Throttle and Automatic Transmission // IEEE Transactions on Control System Technology. May 2007. Vol. 15, Issue 3. Pp. 474–482.
4. Kondo M., Hasegawa Y., Takanami Y., Arai K., Tanaka M., Kinoshita M., Toyota A80E 8-speed Automatic transmission with Novel Power train Control System // SAE Paper. 2007. No. 2007-01-1311, Detroit.
5. Wheals J., Turner C., Ramsay K., O'Neil A., Bennett J., Double Clutch Transmission (DCT) Using Multiplex Linear Actuator Technology and Dry Clutches for High Efficiency and Low Cost // SAE Paper. 2007. No. 2007-01-1096, SAE International, Warrendale.
6. Tsutsui H., Takayuki H., Suzuki A. Makoto H., and Koichi Kojima, Electro-hydraulic control system for Aisin AW new 6-speed automatic transmission // SAE Paper. 2004. No. 2004-01-1638, SAE International, Warrendale, PA.
7. Baran J., Hendrickson J., Solt M. General Motors New Hydra-Matic RWD Automatic Transmission Family. // SAE Paper. 2006. No. 2006-01-0846, SAE International, Warrendale, PA.
8. Lozin A.V., etc., Closed-loop control system for tracked vehicle steering // St. Petersburg State Polytechnical University Journal, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University. 2014. Vol. 3 (202). Pp. 201–208.
9. Magi M. Classical Planetary Gear Train Problems Treated by Novel Powerful Analytical Methods // Proceedings of FISITA 2006. F2006P256.
10. Dobretsov R., Porshnev G., Uvakina D. Performance improvement of arctic tracked vehicles // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) electronic edition. MATEC Web of Conferences, 2018. 171 p.
11. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Газизов А.М. Пути улучшения управляемости лесных и транспортных гусеничных машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 3. С. 97–106.
12. Демидов Н.Н. [и др.]. Фрикционные механизмы поворота в двухпоточных трансмиссиях транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2019. № 1. С. 60–69.

13. Bukashkin A., Galyshev Yu., Dobretsov R., Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1728–1734. [Doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.705](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.705).

14. Дидиков Р.А., Добрецов Р.Ю., Галышев Ю.В. Трансмиссия перспективного колесного трактора с автоматизированной коробкой передач // *Современное машиностроение: Наука и образование*. 2017. № 6. С. 741–753.

15. Salgado D., Castillo M., Selection and Design of Planetary Gear Trains Based on Power Flow Maps // *Journal of Mechanical Design*. 2005. vol. 127. no. 1. Pp. 120–134.

16. Lozin A., Dobretsov R., Medvedev M., Hyperbolic Steering for Tracked Vehicles // *Proc. the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2019. Pp. 2367–2374. [DOI.org/10.1007/978-3-319-95630-5\\_255](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_255).

17. Didikov R., et., Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1735–1740. [DOI.org/10.15866/ireme.v12i9.15646](https://doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646).

18. Porshnev G., Dobretsov R., et., Performance improvement of Arctic tracked vehicles // *MATEC Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2018. Vol. 245. [DOI.org/10.1051/mateconf/201824517001](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824517001).

19. Deur J., Asgari J., Hrovat D. Modeling and analysis of automatic transmission engagement dynamics – Linear case // *ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*. 2006. Vol. 128. Pp. 263–277.

20. Hoodorozhkov S., Krasilnikov A., Zakhlebayev E., Digital simulation of physical processes in vehicles engine power units // *RRTSS – International conference on research paradigms transformation in social sciences*. 2018.

21. Didikov R., Dobretsov R., Galyshev Yu. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox: Management of the Power Distribution Mechanism // *International Review of Mechanical Engineering*. 2018. Vol 12. Pp. 790–796, 2018. [DOI.org/10.15866/ireme.v12i9.15646](https://doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646).

22. Didikov R., et., Power Distribution Control in the Transmission of the Perspective Wheeled Tractor with Automated Gearbox // *Advances in Intelligent Systems and Computing International Scientific Conference EMMFT*. Springer International Publishing AG. 2018. Vol. 692. Pp. 192–200.

## REFERENCES

1. Kuwahara S., Kubonoya H., Mizuno H., Kaigawa M., and Kono K., Toyota's New Integrated Drive Power Control System. *SAE Paper*. 2007; 2007-01-1306, SAE International, Warrendale, PA.

2. Bai Shushan, Brennan D., Dusenberry D., Tao X., and Zhen Zhang, Integrated Powertrain Control. *SAE Paper*. 2010; 2010-01-0368, SAE International, Warrendale, PA.

3. Kim D., Peng H., Bai S., and Maguire J. Control of Integrated Power train With Electronic Throttle and Automatic Transmission. *IEEE Transactions on Con-*

*trol System Technology*. May 2007; Vol. 15, Issue 3: 474–482.

4. Kondo M., Hasegawa Y., Takanami Y., Arai K., Tanaka M., Kinoshita M., Toyota A80E 8-speed Automatic transmission with Novel Power train Control System. *SAE Paper*. 2007; 2007-01-1311, Detroit.

5. Wheals J., Turner C., Ramsay K., O'Neil A., Bennett J., Double Clutch Transmission (DCT) Using Multiplex Linear Actuator Technology and Dry Clutches for High Efficiency and Low Cost. *SAE Paper*. 2007; 2007-01-1096, SAE International, Warrendale.

6. Tsutsui H., Takayuki H., Suzuki A. Makoto H., and Koichi Kojima, Electro-hydraulic control system for Aisin AW new 6-speed automatic transmission. *SAE Paper*. 2004; 2004-01-1638, SAE International, Warrendale, PA.

7. Baran J., Hendrickson J., Solt M. General Motors New Hydra-Matic RWD Automatic Transmission Family. *SAE Paper*. 2006; 2006-01-0846, SAE International, Warrendale, PA.

8. Lozin A.V., etc., Closed-loop control system for tracked vehicle steering. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University*. 2014; 3 (202): 201–208.

9. Magi M. Classical Planetary Gear Train Problems Treated by Novel Powerful Analytical Methods. *Proceedings of FISITA*. 2006. F2006P256.

10. Dobretsov R., Porshnev G., Uvakina D. Performance improvement of arctic tracked vehicles. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018) electronic edition. MATEC Web of Conferences*. 2018: 171.

11. Dobrecov R.Ju., Grigor'ev I.V., Gazizov A.M., Puti uluchsheniya upravlyaemosti lesnyh i transportnyh gusenichnyh mashin [Ways to improve the controllability of forest and transport tracked vehicles]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 3: 97-106 (in Russian).

12. Demidov N.N [i dr.], Friktionnye mehanizmy povorota v dvuhpotochnykh transmissijah transportnyh gusenichnyh mashin [Frictional steering mechanisms in dual-stream transmissions of tracked vehicles]. *Traktory i sel'skohozjajstvennyye mashiny*. 2019; 1: 60–69 (in Russian).

13. Bukashkin A., Galyshev Yu., Dobretsov R., Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox. *Procedia Engineering*. 2017; 206: 1728-1734. [doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.705](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.705).

14. Didikov R.A., Dobrecov R.Ju., Galyshev Ju.V., Transmissija perspektivnogo kolesnogo traktora s avtomatizirovannoj korobkoj peredach [Transmission of wheeled tractor with an automated transmission]. *Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie*. 2017; 6: 741–753 (in Russian).

15. Salgado D., Castillo M., Selection and Design of Planetary Gear Trains Based on Power Flow Maps. *Journal of Mechanical Design*. 2005; 127. no. 1: 120–134.

16. Lozin A., Dobretsov R., Medvedev M., Hyperbolic Steering for Tracked Vehicles. *Proc. the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering, Lecture*

*Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2019: 2367-2374. DOI.org/10.1007/978-3-319-95630-5\_255.

17. Didikov R., ect., Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission. *Procedia Engineering*. 2017; 206: 1735–1740. DOI.org/10.15866/ireme.v12i9.15646.

18. Porshnev G., Dobretsov R., ect, Performance improvement of Arctic tracked vehicles. *MATEC Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2018; 245. DOI.org/10.1051/mateconf/201824517001.

19. Deur J., Asgari J., Hrovat D. Modeling and analysis of automatic transmission engagement dynamics – Linear case. *ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*. 2006; 128: 263–277.

20. Hoodorozhkov S., Krasilnikov A., Zakhlebayev E., Digital simulation of physical processes in vehicles engine power units. *RRTSS – International conference on research paradigms transformation in social sciences*. 2018.

21. Didikov R., Dobretsov R., Galyshev Yu. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox: Management of the Power Distribution Mechanism. *International Review of Mechanical Engineering*. 2018; 12: 790-796, 2018. DOI.org/10.15866/ireme.v12i9.15646.

22. Didikov R., etc., Power Distribution Control in the Transmission of the Perspective Wheeled Tractor with Automated Gearbox. *Advances in Intelligent Systems and Computing International Scientific Conference EMMFT*. Springer International Publishing AG. 2018; 692: 192–200.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Демидов Николай Николаевич – Участвовал в разработке математической модели КПП, анализе полученных результатов, выполнял обзор литературных источников.*

*Красильников Андрей Александрович – Участвовал в разработке математической модели, выполнении расчетов, анализе полученных результатов.*

*Худорожков Сергей Иванович – Организовывал работу авторского коллектива, разрабатывал математическую модель КПП, участвовал в выполнении расчетов, анализе полученных результатов.*

## AUTHOR'S CONTRIBUTION

*Nikolay N. Demidov – participation in the development of the mathematical model; review of theoretical material and sources; results' analysis.*

*Andrey A. Krasilnikov – participation in the development of the mathematical model; computer calculations and analysis of the results.*

*Sergey I. Hoodorozhkov – organization of the author's research process; study of the theoretical material; creation of the mathematical model; computer calculations and analysis of the results.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Демидов Николай Николаевич – канд. техн. наук, доц. Высшей школы транспорта ФГАОУ ВО СПбПУ, ORCID 0000-0002-4055-4935 (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: ndemidov51@mail.ru).*

*Красильников Андрей Александрович – канд. техн. наук, доц. Высшей школы транспорта ФГАОУ ВО СПбПУ, ORCID 0000-0002-8680-3175 (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: a\_kr36@mail.ru\*).*

*Худорожков Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф. Высшей школы транспорта ФГАОУ ВО СПбПУ, ORCID 0000-0002-5646-2998 (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: xcu55@mail.ru).*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Demidov Nikolay Nikolaevich – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ORCID 0000-0002-4055-4935 (195251, St. Petersburg, 29, Politechnicheskaya St., e-mail: ndemidov51@mail.ru).*

*Krasilnikov Andrey Alexandrovich – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher school of Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ORCID 0000-0002-8680-3175 (195251, St. Petersburg, 29, Politechnicheskaya St., e-mail: a\_kr36@mail.ru\*).*

*Hoodorozhkov Sergey Ivanovich – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Higher School of Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ORCID 0000-0002-5646-2998 (195251, St. Petersburg, 29, Politechnicheskaya St., e-mail: xcu55@mail.ru).*

УДК 656.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-72-83>

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТРЕБНОГО ЧИСЛА МЕСТ ДЛЯ ПАРКИРОВАНИЯ ВОЗЛЕ ЦЕНТРОВ МАССОВОГО ТЯГОТЕНИЯ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

**А.В. Зедгенизов<sup>1</sup>, А.В. Базан<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия;<sup>2</sup>Восточно-Сибирский институт МВД РФ,  
г. Иркутск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье рассматриваются проблемы организации паркингов транспортных средств возле крупных торговых центров, описывается их актуальность с учётом транспортного обслуживания торговых точек и мест проживания. Приведены исследования в данной области ведущих учёных, которые нашли отражение в нормативной документации. Целью этой исследовательской работы является совершенствование нормативно-справочной базы при проектировании парковок, обслуживающих центры массового тяготения.

**Материалы и методы.** Приведено математическое описание средней продолжительности паркингования и обозначены основные факторы, влияющие на неё. Предложено математическое описание средневзвешенной продолжительности паркингования, учитывающей долю работников рассматриваемого центра массового тяготения. На основании данных о средней продолжительности паркингования с учетом резервирования мест для работников предложена математическая зависимость, позволяющая проводить расчет потребного числа мест для паркингования. Рассмотрена возможность учёта внутрисовременного дефицита мест для паркингования на основе РНФ- фактора.

**Результаты.** Произведено сравнение полученных значений потребного числа мест для паркингования с нормативными значениями. В исследовании приводится более 30 типов центров массового тяготения и урбанизированных территорий. Рассмотрены примеры оценки потребного числа мест для паркингования возле крупного жилого массива, расположенного на расстоянии 8 км от центра города. Предложена методика оценки потребного числа мест для паркингования на основе относительных нормативных значений, приходящихся на 100 м<sup>2</sup> площади центров массового тяготения.

**Обсуждение и заключение.** Вынесены рекомендации практического применения нормативных значений потребного числа мест для паркингования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** организация паркингования, центры массового тяготения, нормативные значения потребного числа мест для паркингования.

Поступила 28.10.2019, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Коллектив авторов выражает глубокую благодарность руководству ИрНИТУ за поддержку и финансирование исследований, а также благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Для цитирования: Зедгенизов А.В., Базан А.В. Методика оценки потребного числа мест для паркингования возле центров массового тяготения на урбанизированных территориях. Вестник СибАДИ. 2020; 17(1):72-83. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-72-83>

© Зедгенизов А.В., Базан А.В.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-72-83>

## PARKING SPACES NEAR MASS GRAVITY CENTERS IN URBANIZED TERRITORIES: METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE REQUIRED PLACES

**Anton V. Zedgenizov<sup>1</sup>, Alexei V. Bazan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia;

<sup>2</sup>Eastern Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation,  
Irkutsk, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper discusses the problems of organizing the vehicles' parking near large shopping centers and also describes their relevance, taking into account the transport services of retail outlets and residence places. The authors present the research of the problem by leading scientists, which is reflected in the regulatory documentation.

**Materials and methods.** The authors used a mathematical description of the average parking duration and identified the main affecting factors, taking into account the proportion of workers in the mass gravity center. The authors proposed a mathematical dependence based on the average parking duration, taking into account reservation of parking places for workers and the required number of parking spaces for other categories. The paper considered the possibility of the intra-hour deficit of parking places based on the PHF-factor.

**Results.** As a result, the authors made the comparison of the obtained values of the required parking spaces with the standard ones. The paper provided more than 30 types of mass gravity centers and urban areas. In addition, the authors considered the examples of assessing the required number of parking spaces near a large housing estate at the 8 km distance from the city center. Therefore, the authors proposed the technique for assessing the required number of parking spaces based on normative values per 100 m<sup>2</sup> of the area of the mass gravity centers.

**Discussion and conclusions.** The authors present recommendations are made for the practical application of the required number of parking spaces by the normative values.

**KEYWORDS:** parking organization, mass gravity centers, standard values of the required parking places.

**Submitted 28.10.2019, revised 21.02.2020.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors express their gratitude to the management of the Irkutsk National Research Technical University for supporting and financing research, as well as thanks to the editorial office of the journal for the manuscript's processing and for the possibility of publication.

*For citation:* Zedgenizov A.V., Bazan A.V. Parking spaces near mass gravity centers in urbanized territories: methodology for estimating the required places. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):72-83. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-72-83>

© Zedgenizov A. V., Bazan A. V.



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

## ВВЕДЕНИЕ

В практике проектирования объектов городского хозяйства и обслуживания центров массового тяготения (ЦМТ) необходимым элементом являются места для парковки индивидуального транспорта (ИТ). В последние десятилетия эта задача стоит особенно остро. Возросший уровень автомобилизации и увеличение доли поездок на ИТ требуют от проектировщиков создания большего числа мест для парковки с целью повышения качества транспортного обслуживания населения, а в некоторых случаях являются единственным способом привлечения посетителей, например при обслуживании крупных торгово-развлекательных центров. Особенно остро процесс парковки ощущается в пиковые периоды, когда отсутствие места для парковки может служить отказом для посещения ЦМТ.

Проблемы парковки освещены во многих отечественных и зарубежных трудах.<sup>1,2</sup> Прежде всего, стоит отметить труды Вукана Вучика<sup>3</sup> и учёных из российских городов<sup>4,5</sup> [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], направленные на рассмотрение проблемы парковки в целом, а также специалистов по рациональному использованию территории<sup>6</sup> [9, 10, 11, 12]. Оценка продолжительности парковки рассматривалась в трудах [13, 14, 15], а оценка транспортного спроса, учитывающая потребность в парковке, в работах [16, 17, 18, 19, 20, 21]. Пути повышения пропускной способности с учётом потребного числа мест для парковки отмечены в трудах<sup>7</sup>. Для решения проблем

парковки и хранения автомобилей реализуются своды норм и правил федерального значения, учитывающие типы ЦМТ, а также дифференцируют нормативы в соответствии с численностью городского населения. Наиболее удобной формой представления нормативов на проектирование числа мест для парковки ИТ являются относительные показатели, представленные в своде правил<sup>8</sup>. Такого рода нормативные данные представлял российский учёный, наш современник, профессор И.Н.Пугачев.<sup>9</sup> К сожалению, сравнить нормативы по всем типам ЦМТ нет возможности по причине использования разных расчетных единиц, но для основных ЦМТ такое сравнение возможно. Например, число мест для парковки возле жилых домов оценивается исходя из числа 1–2–3-комнатных квартир, причем имеется и дифференциация по расположению относительно станций метрополитена

$$n_{\text{мн}} = 0,1(12x + 4y + 7z), \quad (1)$$

где  $x$  – количество однокомнатных квартир,  $y$  – количество двухкомнатных квартир,  $z$  – количество квартир от трех комнат и более. По данным расчетов (1), автор приходит к выводу о необходимости 1-го машино-места на каждую квартиру, причем на каждую двухкомнатную квартиру необходимо + 0,2 машино-места, трехкомнатную + 0,5 машино-места и +0,2 машино-места на каждую квартиру под гостевую парковку. В п. 11.33 СП<sup>9</sup> сказано, что

<sup>1</sup> Горев А.Э. Основы теории транспортных систем: учебное пособие / А.Э. Горев. СПб. : СПбГАСУ, 2010. 214 с.

<sup>2</sup> Городков А.В., Федосова С.И. Основы территориально-пространственного развития городов: учебное пособие. Брянск : БГИТА, 2009. 326 с.

<sup>3</sup> Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина под научн. ред. М. Блинкина: Территория будущего. Москва, 2011 г.

<sup>4</sup> Муковкина В.Е., Корчева Д.В., Зедгенизов А.В. Оценка продолжительности парковки транспортных средств возле торгового центра «Город мастеров» // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. научных трудов студентов и преподавателей института авиамашиностроения и транспорта. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 104–110 с.

<sup>5</sup> Коржанков В.Б. Парковки у торговых центров как часть транспортной инфраструктуры города: материалы Международной очно-заочной научно-технической конференции // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта. Тула, 2017. С. 283–286.

<sup>6</sup> Кудрявцев А.О. Рациональное использование территории при планировке и застройке городов СССР. М.: Стройиздат, 1971.

<sup>7</sup> Коржанков В.Б. Парковки у торговых центров как часть транспортной инфраструктуры города: материалы Международной очно-заочной научно-технической конференции..... С. 283–286.

<sup>8</sup> СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89 / Минстрой России, Москва, 2016. 94 с.

<sup>9</sup> Пугачев И.Н. Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов: автореф. дис. ... д-ра наук. Екатеринбург, 2010 (ЦНИИП градостроительства).

на территории жилых районов и микрорайонов следует предусматривать места для хранения автомобилей в подземных стоянках автомобилей из расчета в крупных и крупнейших городах не менее 0,5, а в больших городах – не менее 0,2 машино-места на одну квартиру. Применение выражения (1) требует достаточно детального плана здания, в т.ч. имеющихся отличий по числу комнат, которые хотя и дают более высокую точность расчета, но при этом требуют наличия труднодоступной информации.

В нормативной литературе<sup>10</sup> приведены данные о числе парковочных мест в зависимости от типа ЦМТ. В качестве расчетного показателя выбраны весьма разнообразные параметры, что усложняет процесс расчёта, например, для промышленных предприятий, административных учреждений число мест для парковки предлагается оценивать на основе числа работающих, для предприятий торговли – на основе торговой площади, для поликлиник – на основе числа корреспонденций и др. Данные приведены на максимальный уровень автомобилизации 250 авт./1000 жителей. Так, например, в соответствии с СП 42.13330.2016 для предприятий торговли (торговые центры, универмаги) предполагается 5–7 мест на каждые 100 м<sup>2</sup> торговли.

Научные изыскания в отношении определения необходимого числа мест для парковки в зависимости от численности городского населения и уровня автомобилизации проводились в источниках<sup>11</sup>, в частности были установлены следующие зависимости:

$$K_n = \frac{K_{\max} \cdot Q_n \cdot U_n \cdot \delta}{Q \cdot U}, \quad (2)$$

где  $K_{\max}$  – максимальное число автомобилей на стоянке в данный период;  $Q$  и  $Q_n$  – существующая и перспективная ёмкость обслуживаемого стоянкой объекта, выражена максимальным числом посетителей;  $U$  и  $U_n$  – существующий и перспективный уровень автомобилизации города или региона (авт./1000 чел.);  $\delta$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменения интенсивности использования автомобиля в будущем (при отсутствии указанных данных можно принимать 0,8–1).

Суть представленного выражения заключается в вычислении так называемых коэффициентов роста в виде отношения существующей и перспективной ёмкости территории, а также уровня автомобилизации. Наиболее ценной является переменная  $K_{\max}$ , поскольку показывает потребность в парковании в данный момент, которую можно определить на основе суммарного числа посетителей в пиковый час, доли посетителей на ИТ и средней продолжительности паркования.

Развитие общества в целом и уровня автомобилизации в частности требует непрерывного обновления нормативных значений потребного числа мест для паркования с целью полного и своевременно транспортного обслуживания жителей нашей страны. Кроме этого, приведённые данные в нормативной литературе не охватывают весь перечень типов центром массового тяготения, в том числе появившихся в последнее время.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Продолжительность паркования неразрывно связана с типом посещаемого ЦМТ, особенностями технологических процессов, быстротой и своевременностью обслуживания, наличия очередей при обслуживании, площадью ЦМТ, удобством навигации на ЦМТ и другими факторами. Продолжительность паркования является одним из ключевых показателей функционирования ЦМТ, на её основе производится расчет потребного числа мест для обслуживания посетителей, прибывающих на ИТ. Продолжительность паркования отражает продолжительность посещения ЦМТ и косвенно показывает качество обслуживания. Этот параметр является одним из наиболее сложных с точки зрения измерения в натуральных условиях. Необходимо фиксировать моменты прибытия и убытия каждого автомобиля с рассматриваемого ЦМТ:

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n (t_y - t_n)}{n}, \quad (3)$$

где  $t_p$  – средняя продолжительность паркования, мин;  $t_y$  – время убытия, ч:мин;  $t_n$  – время прибытия, ч:мин;  $n$  – число замеров (число автомобилей за день/смену). В зависимости от

<sup>10</sup> СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89 / Минстрой России, Москва, 2016. 94 с.

<sup>11</sup> Шештокас В. В., Адомавичюс В. И., Юшкавичюс П. В. Гаражи и стоянки: учебное пособие для вузов; под общ. ред. В.В. Шештокаса. М.: Стройиздат, 1984. 214 с, ил.

цели поездки и ЦМТ, к которому совершается корреспонденция, будет зависеть продолжительность парковки. При совершении трудовых корреспонденций продолжительность использования автомобиля не превышает 10–15% времени, остальное время занимает продолжительность парковки, наоборот, при совершении культурно-бытовых и деловых корреспонденций, особенно в крупных и крупнейших городах, доля времени парковки может составлять до 50% и выше. Поэтому выявление средней продолжительности парковки в зависимости от цели поездки и типа ЦМТ является важной научной и практической задачей.

Данные исследований числа посетителей по городам разных категорий показывают, что данные СНИП не соответствуют сегодняшнему спросу на паркование. В крупных и крупнейших городах число мест для парковки необходимо примерно в 1,5–2 раза больше в абсолютных показателях, чем в малых и средних городах. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дифференцированного подхода оценки числа мест для парковки в городах разной численностью населения. Однако следует принять этот вывод с оговоркой о том, что он преимущественно будет распространяться на объекты культурно-бытовой направленности, поскольку нормы времени труда, продолжительность обучения и т.п. являются едиными на всей территории РФ.

В ходе натурных исследований и обработки экспериментальных данных было установлено, что довольно большая часть замеров продолжительности парковки имеет чрезвычайно высокие значения, резко отличающиеся от среднеквадратичного отклонения, в большинстве случаев такие исключения или, как их называют в математической терминологии, «артефакты» возникают в результате постановки ИТ на общую парковку рабочими и служащими данного ЦМТ. Естественно, что продолжительность парковки таких автомобилей часто совпадает с продолжительностью работы ЦМТ (смены). В отношении ЦМТ, которые относятся к жилым зонам, а также кемпингов, баз отдыха, гаражных кооперативов, стоянок длительного хранения подобные «артефакты» могут объясняться спецификой функционирования этих территорий, например, весьма трудно прогнозируется время пребывания на приеме у врача или офисная работа, предполагающая совершение деловых корреспонденций «по требованию». Та-

ким образом, в случае отсутствия специальной ведомственной парковки для работников учреждения необходимо учитывать долю нестандартных случаев продолжительности парковки, учёт которой можно осуществлять на основе расчета средневзвешенного значения продолжительности парковки

$$t'_p = t_p^n(1 - d_a) + t_p^a \cdot d_a, \quad (4)$$

где  $t'_p$  – средневзвешенная продолжительность парковки, мин;  $t_p^n, t_p^a$  – продолжительность парковки посетителей и сотрудников/артефактов соответственно, мин;  $d_a$  – доля сотрудников/артефактов. На основании этого выражения можно проводить расчеты отдельно для ведомственных парковок и парковок посетителей, тем самым более рационально используя пространство для парковки. Наиболее ярким примером являются парковки возле крупных торговых (торгово-развлекательных) центров, поскольку наиболее привлекательные места (расположенные ближе к входу) занимают работниками торгового комплекса и практически не работают в течение всего рабочего дня, снижая тем самым производительность парковки и качество транспортного обслуживания посетителей.

На основании данных о средней продолжительности парковки с учетом резервирования мест для работников  $t'_p$  необходимо предложить математическую зависимость, позволяющую проводить расчет требуемого числа мест для парковки. В состав такой зависимости должны войти данные о суточной генерации корреспонденций, доле посетителей на ИТ, наполнения ИТ, коэффициенты суточной неравномерности и по возможности коэффициент фактора часа пик. Учитывая перечисленные факторы, имеем

$$K_{\Pi} = \frac{G \cdot S \cdot d_{\text{ит}} \cdot k_{\text{сн}} \cdot t'_p}{e_{\text{ит}} \cdot 60}, \quad (5)$$

где  $G$  – удельная генерация корреспонденций, корр./м<sup>2</sup>;  $d_{\text{ит}}$  – доля посетителей на ИТ;  $k_{\text{сн}}$  – коэффициент суточной неравномерности (как правило, для часа с максимальной загрузкой);  $e_{\text{ит}}$  – наполнение салона ИТ, чел.;  $t'_p$  – средневзвешенная продолжительность парковки, мин; 60 – переводной коэффициент из минут в часы;  $S$  – площадь ЦМТ, м<sup>2</sup>.

Представляется, что наиболее удобным показателем, характеризующим требуемое число мест для парковки, является удельный

показатель требуемого числа мест на единицу площади (100 м<sup>2</sup>) ЦМТ:

$$N_{K\Pi} = \frac{G \cdot d_{ит} \cdot k_{сн} \cdot t_p \cdot 10}{e_{ит} \cdot 6} \quad (6)$$

Важным аспектом при определении требуемого числа мест для парковки выступает так называемый фактор часа пик (PHF-фактор). С точки зрения повышения надежности парковки также необходимо учитывать фактор часа пик, поскольку в пиковые часы количество заявок на парковку может резко вырасти в течение короткого промежутка времени, что может создать очереди и даже заторы на участках въезда и выезда с парковки. Математическое выражение фактора часа пик выглядит следующим образом:

$$PHF = \frac{N_{пик}}{6 \cdot N_{10}}, \quad (7)$$

где  $N_{пик}$  – суммарная интенсивность поступления заявок на парковку за час пик, авт.;  $N_{10}$  – интенсивность поступления заявок на парковку за максимальную десятиминутку, авт. Значения PHF-фактора для практических расчётов следует принимать на основании натурных исследований при их наличии.

В таблице вариационный диапазон указан для условий внутричасового пика, который может быть учтен через PHF-фактор. В классической статистической литературе PHF-фактор представляет собой отношение максимального значения показателя внутричасового периода, например, 15 или 20-минутного интервала к сумме этого периода, но за час, соответственно, при 15-минутном интервале сумма будет состоять из четырёх таких интервалов, а

при 20-минутном интервале из трёх. Фактически выбор норматива ближе к нижней границе может означать отказ в предоставлении места в пиковые периоды, продолжительность которых, как правило, не превышает одного-двух часов. Всё остальное время функционирования ЦМТ мест для парковки будет достаточно. С приближением к верхней границе норматива отказы на парковку в пиковые периоды будут уменьшаться до полного отсутствия дефицита.

Пример формирования спроса на парковку целесообразно провести на объектах, которые являются предметом всеобщего критического наблюдения. Как правило, такими объектами будут крупные торговые центры, жилые комплексы (рисунок 1), объекты социальной направленности (поликлиники, общественные приемные) в качестве примера рассмотрен жилой массив из трех пятиэтажных домов, объединенных единым внутриворонным пространством и общим архитектурным замыслом. Удаленность жилого массива от центра города составляет примерно 8 км, общая площадь с учетом этажности 18600 м<sup>2</sup>. Следует отметить, что исследования фактически занятых машино-мест для рассматриваемого жилого массива проводились в выходной день (суббота), например, исследования, проведенные для этого же жилого массива в будние дни, показывают меньшие результаты, поскольку продолжительность парковки существенно ниже. Характер предлагаемого распределения имеет существенный спад числа припаркованных автомобилей в вечернее время, что объясняется наличием в непосредственной близости нескольких гаражных кооперативов и охраняемых стоянок, которыми пользуются жильцы исследуемого объекта.



Рисунок 1 – Оценка требуемого числа машино-мест для жилого массива

Figure 1 – Estimation of the required number of parking spaces for the housing estate

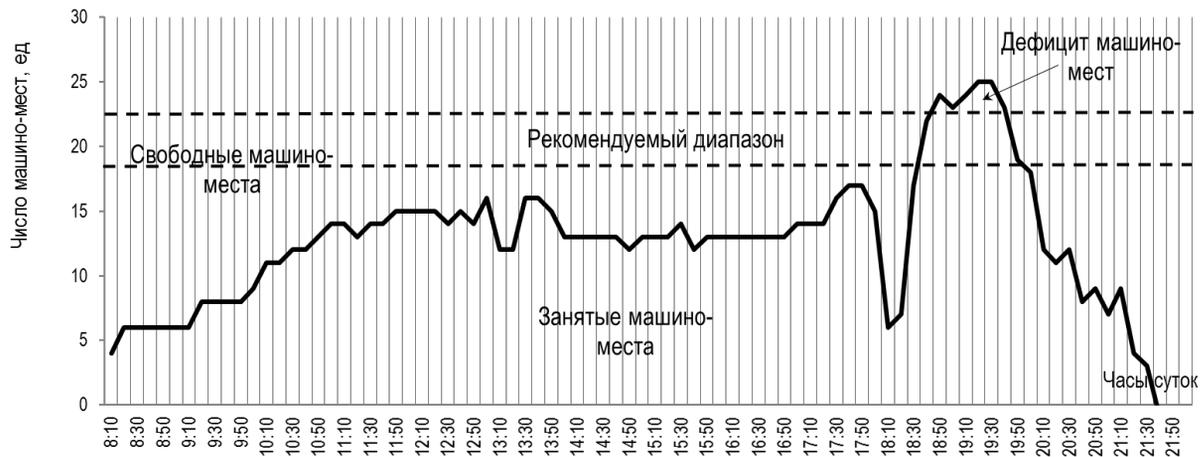


Рисунок 2 – Оценка потребного числа машино-мест для универсама

Figure 2 – Estimation of the required number of parking spaces for the department store

ЦМТ, подвергающиеся особой критической оценки со стороны посетителей, – объекты торговли. Нередко отсутствие мест для парковки или неудобное их расположение является причиной отказа от посещения торгового заведения. В качестве примера рассмотрен универсам торговой площадью 270 м<sup>2</sup>, расположенный на расстоянии 1,4 км от центра города (рисунок 2). Несмотря на предлагаемый диапазон обеспечения, местами для парковки в пиковый период все же возникает небольшой дефицит машино-мест (в пределах 10–12% от потребного числа).

Таким образом, следует заключить, что данные потребного числа мест для парковки

по некоторым типам ЦМТ имеют незначительные отличия с действующими нормативами, например, кинотеатры, религиозные учреждения, банки, прием платежей и др. Кроме того, ЦМТ, никак не упомянутые в действующем СНИПе, сегодня особенно остро нуждаются в нормировании, а именно: жилье в дифференциации по типу, организации, выполняющие техническое обслуживание автомобилей и др.

Приведенная методика оценки потребного числа мест для парковки может быть сконцентрирована и представлена на принципиальной схеме в виде 7 последовательных шагов (рисунок 3).

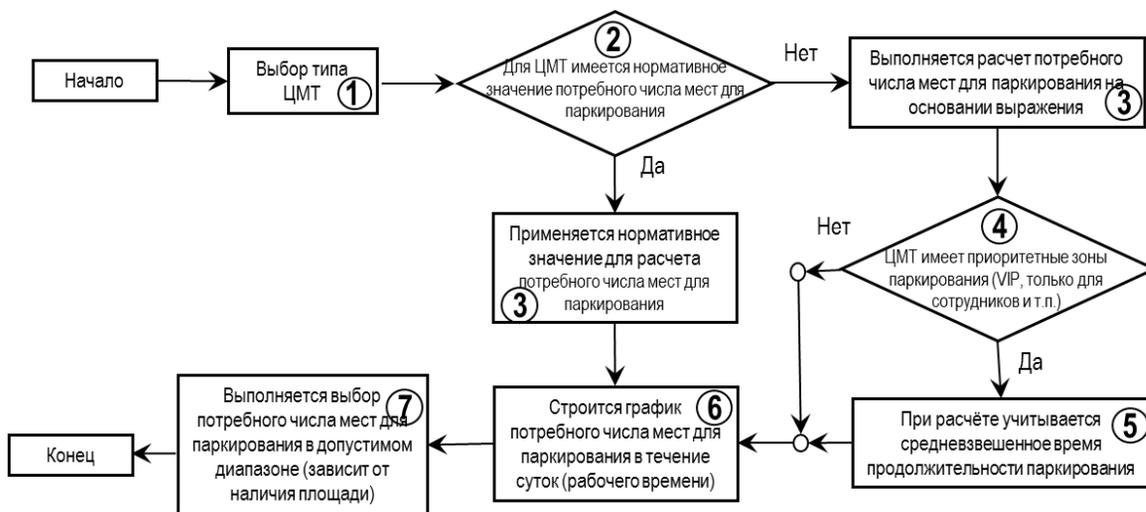


Рисунок 3 – Принципиальная схема оценки потребного числа мест для парковки

Figure 3 – Schematic diagram of the assessment of the required parking spaces

Таблица  
Нормативы расчета потребного числа мест для парковки

Table  
Standards for calculating the required parking spaces

Наименование ЦМТ Name Center of gravity	Расчетная единица Unit of account	Число машино-мест на расчетную единицу Number of parking spaces per unit of account	Норматив СНиП 89* Norm SNiP 89 *	Норматив СП 42.13330.2016
Логистический центр	100 м <sup>2</sup>	0,47–1,11		
Завод	Га	6,28–12,00		
Жилье средней этажности (от 4 до 10 этажей)	100 м <sup>2</sup>	0,36–0,58		
Частный сектор (отдельные поселки)	Га	5,68–9,90		
Частный сектор (городская территория)	Га	22,00–44,00		
СНТ (Садоводческие некоммерческие товарищества)	Га	2,08–3,33	11,6–16,6	
Детские сады, ясли	100 м <sup>2</sup>	0,77–1,35		
Учебные заведения ВПО (институты, академии, университеты)	100 м <sup>2</sup>	0,47–0,86		
Средние школы	100 м <sup>2</sup>	0,48		
Школы раннего развития детей	100 м <sup>2</sup>	10		
Кинотеатры	100 м <sup>2</sup> / На 100 посетителей	1,17–2,47 / 8,78 – 15,00	нет / 10–15	- / 8,33–12,5
Физкультурно-оздоровительные центры (ФОК)	100 м <sup>2</sup> / 100 единовре- менных посетителей	1,67–3,94 / 39,7		- / 10–12,5
Бани, сауны	100 м <sup>2</sup> / 100 единовре- менных посетителей	0,43–1,33 / 36,8		- / 16,6–20
Туристические базы	Га / На 100 посетителей	34 / 27	нет / 3–5	
Почта, телеграф, АТС	100 м <sup>2</sup>	3,87–6,68		
Религиозные учреждения (церкви, приходы, монастыри)	Га / 100 единовременных посетителей	0,92 / 7,58		- / 10–12,5
Больницы, госпитали	100 м <sup>2</sup>	0,85–1,24		
Поликлиники	100 м <sup>2</sup> / На 100 посетителей	1,2–2,18 / 2,82– 6,64	нет / 2-3	
Банки, прием платежей	100 м <sup>2</sup>	2–3,81		2,85–3,33
Нотариусы	100 м <sup>2</sup>	4,23 – 6,35		
Проектные организации (институты, лаборатории)	100 м <sup>2</sup>	0,8–1,74		1,4–1,7
Строительные товары (магазины, торговые центры)	100 м <sup>2</sup>	7,9–11,52		
Строительные товары (рынки, площади открытого типа)	100 м <sup>2</sup>	0,74–1,05		
Аптеки	100 м <sup>2</sup>	3,39–7,74		
Продуктовые магазины	100 м <sup>2</sup>	2,26–3,48		2–2,5
Многофункциональные торговые центры (более 5 типов ЦМТ)	100 м <sup>2</sup>	6,86–8,11	5–7	2,85–3,33
Алкомаркет	100 м <sup>2</sup>	3,24–6,16		1,42–1,66
СТО	100 м <sup>2</sup>	0,57		

Из рисунка 4 видно, что при оценке потребного числа мест для парковки важную роль играют этапы выбора типа ЦМТ, учет наличия выделенных зон для парковки, а также выбор наиболее рационального числа мест с учетом пиковых периодов, позволяющих обслуживать посетителей ЦМТ, прибывающих на ИТ на высоком уровне.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Результатами предлагаемого исследования является методика оценки потребного числа мест для парковки и её сопоставление с нормативной литературой. Однако в данном исследовании не представляется возможным учесть все многообразие удельных показателей (расчетных единиц), используемых в этом нормативном документе (число парко-мест, отнесенных на каждых 100 посетителей, 100 работников, 100 коек, 1000 студентов и т.п.). Учитывая, что между площадью ЦМТ и приве-

денными удельными показателями существует взаимосвязь, в том числе и на уровне СП 42.13330.2016, то предлагается использовать универсальную расчетную единицу – площадь ЦМТ (таблица), соответствующую уровню автомобилизации 300–350 авт./1000 жит. Однако следует сделать небольшое пояснение относительно площади ЦМТ– это площадь самого здания, включающая этажность. Исключением являются ЦМТ, хозяйственная деятельность которых неразрывно связана не только с имеющимися зданиями и сооружениями, но и с незастроенной территорией, например, логистические центры, заводы, жильё в виде частного сектора, туристические базы и т.п.. Площадь таких ЦМТ определяется по площади земельного участка, в границе которого организована хозяйственная деятельность.

Для наглядности нормативные данные таблицы представлены на рисунке 4.

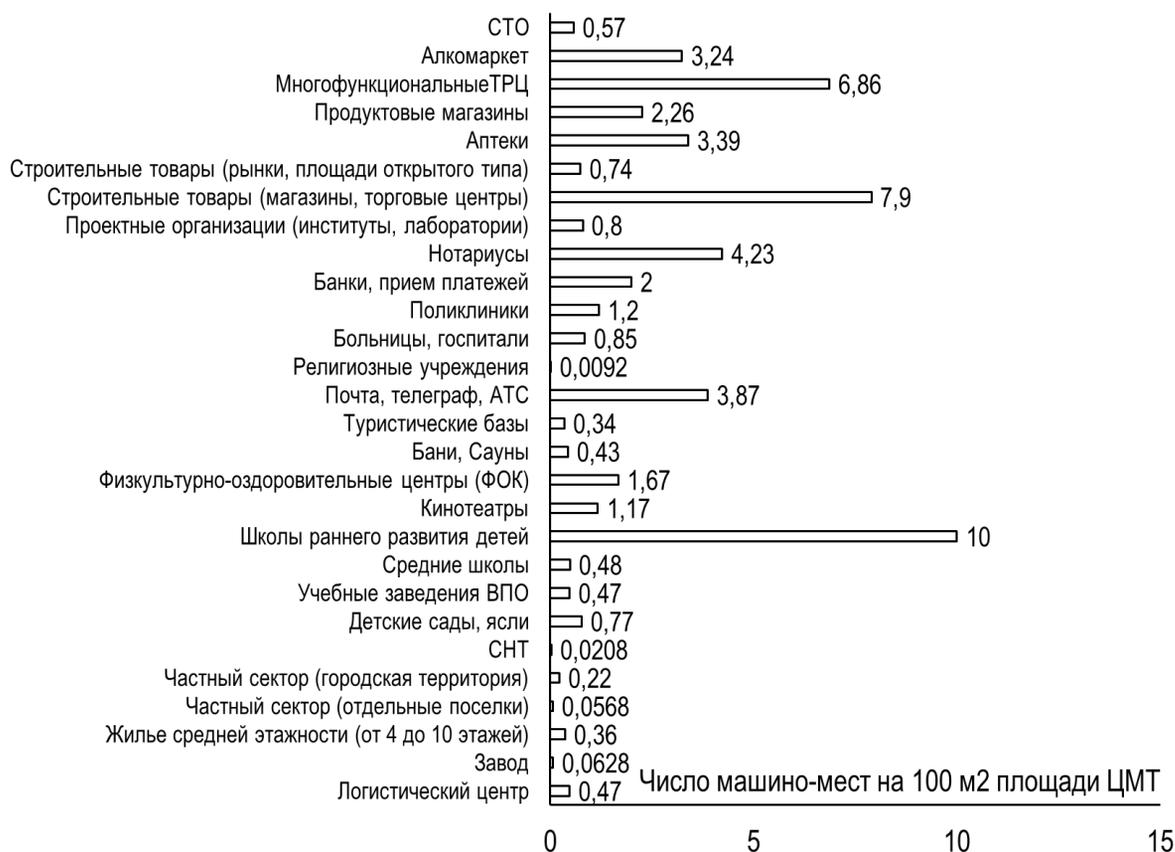


Рисунок 4 – Нормативные значения числа машино-мест по ЦМТ

Figure 4 – Standard values for the number of car seats according to the parking spaces

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обозначенная научно-практическая проблема транспортного обслуживания пользователей ИТ сохраняется. Применение наукоёмких методов на основе оценки транспортного спроса и средней продолжительности паркования позволит максимально эффективно применять методику оценки потребного числа мест для паркования с учётом дифференциации по типам ЦМТ и численности городского населения. При проектировании и вводе в эксплуатацию центров массового тяготения в градостроительной терминологии (это объекты капитального строительства), необходимо учитывать достаточное число мест для паркования, поскольку их недостаток может привести к значительным потерям времени не только посетителей, использующих ИТ, но и других участников дорожного движения, осуществляющих транзитное движение в зоне влияния, рассматриваемого ЦМТ. Предлагаемая методика, основанная на математическом выражении потребного числа мест для паркования (5) и соответствующие ей нормативные значения потребного числа мест для паркования являются незаменимым инструментом прогнозирования потребного числа мест для паркования на этапе проектирования ЦМТ. Основными потребителями предлагаемой методики должны выступить проектные организации, а также представители бизнес-сообществ всех форм собственности при проектировании центров массового тяготения на разных стадиях градостроительно-транспортного планирования, что позволит существенно повысить качество обслуживания пассажиров на ИТ и снизить накладные затраты времени при осуществлении поездок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zedgenizov A. V. The estimation of correspondence generation to the residential district of city center // *Nauka i studia*. 2014. № 16(126). С. 76–83.
2. Фадеев Д.С., Прокофьева О.С. Мировые тенденции в формировании политики паркования транспортных средств // *Вестник ИргТУ*. 2012. № 12(71). С. 170–176.
3. Попова И. М., Провидонов Е. В. Пути повышения пропускной способности улично-дорожной сети // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2015. Т. 35. С. 121–125.
4. Блюдин А.А., Романкова А.А., Буркина В.А., Власов А.А. Моделирование работы парковок // *Современная техника и технологии*. 2014. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/12/5097> (дата обращения: 07.02.2019).
5. Агуреев И.Е., Юрченко Д.А. Обследование придомовых территорий городских жилых районов как источников формирования автомобильного транспорта // *Мир транспорта и технологического машин*. Орел: Издательство Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, 2018. С. 82–88.
6. Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // *Автоматика и телемеханика*. 2009. № 10. С. 148–157.
7. Зедгенизов А.В., Зедгенизова А.Н. Особенности сбора исходных данных при оценке числа припаркованных автомобилей возле жилых объектов // *Вестник ИргТУ*. 2011. № 12 (48). С. 105–108.
8. Михайлов А.Ю., Тарасюк Ю.В. Обследования стоянок в центральной части Иркутска: сборник научных трудов // *Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири*. Ч. 1. Иркутск: ИГЭА. 2002. С. 293–297.
9. Zedgenizov A.V. Burkov D.G. Methods for the Traffic Demand Assessment Based on the Quantitative Characteristics of Urban Areas Functioning. 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities", SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia. Edited by Ulrich Brannolte, Pavel Pribyl and Valentin Silyanov. *Transportation research procedia*. Pp. 724–730.
10. Агуреев И.Е., Пышный В. А., Кущенко Л. Е. [и др.] Вопросы управления городскими транспортными системами // *Современные социально-экономические процессы: Проблемы, закономерности, перспективы*. Пенза, 2017. С. 72–94.
11. Боровик Е.Н. Формирование парковочных пространств на территории Москвы // *Транспортная безопасность и технологии*. 2005. № 2(3).
12. *Parking Design Manual*, County of San Diego, February 2013.
13. Kitamura R, Nishii K., Gouliia K. Trip Chaining Behavior by Central City Commuters: A Causal Analysis of Time-Space Constraints // *Paper in the Developments in Dynamic and Activity-Based. Approaches to Travel Analysis*; Edited by Peter Jones, Gower Publishing Company Limited. England. 1990.
14. *Trip Generation*, 8th Edition. Washington, DC: Institute of Transportation Engineers (ITE). 2008.
15. Shared parking analysis lane parke mountain brook, alabama prepared for: goodwyn, mills, & cawood, inc. february, 2012.
16. Zedgenizov, A. Location-based transport demand forecasting methods for suburbanized areas. *Proceedings of the international conference: aviamechanical engineering and transport // AER-Advances in Engineering Research*. 2018. Volume 158. Pp. 458–461.
17. Агуреев И.Е., Юрченко Д.А. Постановка задачи о загрузке УДС города с учетом данных о функционировании придомовых стоянок автомобилей // *Вестник СибАДИ*. 2019. 16(6). С. 670–679. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679>.
18. *Parking Standards Design and Good Practice*, Essex Planning Officers Association, September 2009.

19. PARKING ANALYSIS FOR THE CAPITOLA VILLAGE AREA Prepared for the City of Capitola, Prepared By RBF Consulting, Monterey Bay, December 11, 2008.

20. Recommendation for Traffic Provisions within Built-up Areas, CROW, Nederland, 1998.

21. Shared Parking Analysis and Recommendations. City of Falls Church, USA, January 2016.

## REFERENCES

1. Zedgenizov A.V. The estimation of correspondence generation to the residential district of city center. *Nauka i studia*. 2014; 16(126):76–83.

2. Fadeev D.S., Prokof'eva O.S. Mirovye tendencii v formirovanii politiki parkirovaniya transportnyh sredstv [Global trends in vehicle parking policy]. *Vestnik IrGTU*. 2012; 12(71):170–176 (in Russian).

3. Popova I.M., Providonov E.V. Puti povysheniya propusknoy sposobnosti ulichno-dorozhnoy seti [Ways to increase the capacity of the street-road network]. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal «Koncept»*. 2015; 35: 121–125 (in Russian).

4. Bljudin A.A., Romankova A.A., Burkina V.A., Vlasov A.A. Modelirovanie raboty parkovok [Modeling of work of parkings]. *Sovremennaja tehnika i tehnologii*. 2014. № 12 Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/12/5097> (accessed at: 07.02.2019) (in Russian).

5. Agureev I.E., Jurchenko D.A. Obsledovanie pridomovyh territorij gorodskih zhilyh rajonov kak istochnikov formirovaniya avtomobil'nogo transporta [Survey of urban residential areas as sources of road transport]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. Orel: Izdatel'stvo Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta im. I.S. Turgenyeva, 2018: 82–88 (in Russian).

6. Shvecov V.I. Algoritmy raspredeleniya transportnyh potokov [Traffic flow allocation algorithms]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2009; 10: 148–157 (in Russian).

7. Zedgenizov A.V., Zedgenizova A.N. Osobennosti sbora ishodnyh dannyh pri ocenke chisla priparkovannyh avtomobilej vozle zhilyh ob'ektov [Features of initial data collection when estimating the number of parked vehicles near residential facilities]. *Vestnik IrGTU*. 2011; 12 (48): 105–108 (in Russian).

8. Mihajlov A.Ju., Tarasjuk Ju.V. Obsledovaniya stojanok v central'noj chasti Irkutsk: sbornik nauchnyh trudov [Surveys of parking in the central part of Irkutsk]. *Intellektual'nye i material'nye resursy Sibiri*. Ch. 1. Irkutsk: IGJeA. 2002: 293-297 (in Russian).

9. Zedgenizov A.V. Burkov D.G. Methods for the traffic demand assessment based on the quantitative characteristics of urban areas functioning. 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities", SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia. Edited

by Ulrich Brannolte, Pavel Pribyl and Valentin Silyanov. Transportation research procedia: 724–730.

10. Agureev I.E., Pyshnyj V.A., Kushhenko L. E. i dr. Voprosy upravleniya gorodskimi transportnymi sistemami [Urban transport management issues]. *Sovremennye social'no-jekonomicheskie processy: Problemy, zakonomernosti, perspektivy*. Penza, 2017: 72–94.

11. Borovik E.N. Formirovanie parkovochnyh prostranstv na territorii Moscow [Formation of parking spaces on the territory of Moscow]. *Transportnaja bezopasnost' i tehnologii*. 2005; 2(3).

12. Parking Design Manual, County of San Diego, February 2013.

13. Kitamura R, Nishii K., Goulia K. Trip Chaining Behavior by Central City Commuters: A Causal Analysis of Time-Space Constraints // Paper in the Developments in Dynamic and Activity-Based. Approaches to Travel Analysis; Edited by Peter Jones, Gower Publishing Company Limited. England. 1990.

14. Trip Generation, 8th Edition. Washington, DC: Institute of Transportation Engineers (ITE). 2008.

15. Shared parking analysis lane parke mountain brook, alabama prepared for: goodwyn, mills, & cawood, inc. february, 2012.

16. Zedgenizov, A. Location-based transport demand forecasting methods for suburbanized areas. Proceedings of the international conference: aviamechanical engineering and transport. *AER-Advances in Engineering Research*. 2018; 158: 458-461.

17. Agureev I.E., Jurchenko D.A. Postanovka zadachi o zagruzke UDS goroda s uchetom dannyh o funkcionirovanii pridomovyh stojanok avtomobilej [Functioning of the car parking places near houses: formulation of the problem of the road city network]. *Vestnik SibADI*. 2019; 16(6): 670–679. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679> (in Russian).

18. Parking Standards Design and Good Practice, Essex Planning Officers Association, September 2009.

19. PARKING ANALYSIS FOR THE CAPITOLA VILLAGE AREA Prepared for the City of Capitola, Prepared By RBF Consulting, Monterey Bay, December 11, 2008.

20. Recommendation for Traffic Provisions within Built-up Areas, CROW, Nederland, 1998.

21. Shared Parking Analysis and Recommendations. City of Falls Church, USA, January 2016.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Зедгенизов Антон Викторович – Все научные положения, выдвигаемые в статье, нормативные данные по числу мест потребного для паркирования, а также соответствующая методика принадлежат автору.*

*Базан Алексей Витальевич – Оформление, поиск и подбор соответствующих источников литературы, а также процесс вычисления нор-*

мативных данных по числу мест потребного для парковки.

#### **AUTHORS' CONTRIBUTION**

*Anton V. Zedgenizov – scientific provisions; normative data of required parking spaces; author's corresponding methodology.*

*Alexei V. Bazan – design, search and selection of relevant literature sources; process of calculating regulatory data on the required parking spaces.*

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Зедгенизов Антон Викторович – канд. техн. наук, доц. ИрННТУ, (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. И-213, e-mail: azedgen@gmail.com).*

*Базан Алексей Витальевич – преподаватель кафедры специальной подготовки ФГКОУ ВО ВСИМВД РФ, (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 110).*

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Anton V. Zedgenizov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83, Lermontova St., e-mail: azedgen@gmail.com).*

*Alexei V. Bazan – Lecturer of the Department of the Special Training, Eastern Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation (664074, Irkutsk, 110, Lermontova St.)*

УДК 621.357

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**А.Н. Котомчин<sup>1</sup>, А.Ф. Синельников<sup>1</sup>, Н.И. Корнейчук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
г. Москва, Россия;

<sup>2</sup>Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,  
г. Тирасполь, Молдавия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе эксплуатации автомобилей возникает потребность в качественном ремонте с минимальными затратами времени и ресурсов. Производится постоянный поиск путей снижения затрат на эксплуатацию автомобилей с помощью снижения затрат на покупку оригинальных запасных частей. Один из способов снижения затрат на запасные части – восстановление ресурсоопределяющих дорогостоящих деталей автомобилей. В связи с этим идёт поиск выбора оптимальных способов восстановления деталей машин, которые будут отвечать экономическим и техническим требованиям и у которых ресурс будет не менее новой запасной части. Целью работы является обоснование целесообразности использования при восстановлении деталей машин гальванических покрытий, в частности хромирования.

**Материалы и методы.** В результате данных исследований проведено обоснование целесообразности восстановления деталей машин гальваническими покрытиями и представлена методика выбора рационального способа восстановления деталей машин. Установлено, что у большого количества деталей износы находятся в интервале 0,1...0,5 мм, в результате чего может быть использован один из способов восстановления – износостойкими покрытиями электролитического хромирования.

**Результаты.** В результате оптимизации состава существующего холодного саморегулирующегося электролита появилась возможность расширения диапазона рабочих температур (до 35 °С), при котором возможно получение качественных покрытий с высокой производительностью.

**Обсуждение и заключение.** На основании полученных результатов исследований можно заключить, что в современных условиях производства и ремонта автомобилей для определённой номенклатуры ресурсоопределяющих деталей возможно использовать один из способов восстановления, а именно хромирование. Но для уменьшения затрат и увеличения производительности хромирования необходимо его усовершенствование путем оптимизации состава электролита и режимов электролиза.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** запасные части, оригинальные детали, восстановление, ресурс, сопряжение, износ, надёжность, хромирование, плотность тока.

Поступила 01.12.2019, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Особая благодарность директору МУП «КоммуналДорСервис» В.И. Драненко за предоставленную площадку по исследованиям данных по эксплуатации техники на предприятии, предоставлении материалов для исследований по износу деталей дорожно-строительных машин, специализированного автотранспорта. Также благодарность Министерству экономического развития ПМР за финансирование научно-исследовательской лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко и Государственного заказа, в рамках которого производились данные исследования. Благодарность рецензентам статьи.

Для цитирования: Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (1): 84-97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

© Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

## RESTORATION OF MACHINE PARTS: CHOICE OF THE METHOD

**Aleksei N. Kotomchin<sup>1</sup>, Anatoly F. Sinelnikov<sup>1</sup>, Nikolai I. Korneychuk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),  
Moscow, Russia;

<sup>2</sup>Pridnestrovian State University. named after T.G. Shevchenko,  
Tiraspol, Moldavia

### ABSTRACT

**Introduction.** In the process of operation of cars there is a need for quality repairs with minimal time and resources. There is a constant search for ways to reduce the cost of operating cars by reducing the cost of buying original spare parts. One way to reduce the cost of spare parts is the restoration of resource-defining expensive car parts. In this regard, there is a search for the selection of optimal ways to restore machine parts that meet the economic and technical requirements and which have a resource of a new spare part. The purpose of the research is to substantiate the feasibility of using galvanic coatings in particular chrome plating in the restoration of machine parts.

**Materials and methods.** The authors proved a rationale recovery of parts of machines galvanized coating and the method of choice of the rational restoration of car details. Moreover, the authors established that a large number of parts are in the range of 0.1...0.5 mm, as a result, the authors used wear-resistant coatings of electrolytic chrome plating.

**Results.** As a result of optimizing the composition of the existing cold self-regulating electrolyte, the authors expanded the operating temperature range (up to 35 °C), at which it was possible to obtain high-quality coatings with high performance.

**Discussion and conclusions.** The authors conclude that in modern conditions of the car production and repair and for certain nomenclature of resource-defining details, it is possible to use one of the restoration ways, namely, chrome plating. In order to reduce costs and increase the performance of chrome plating, it is necessary to improve it by optimizing the electrolyte composition and electrolysis modes.

**KEYWORDS:** spare parts, original parts, restoration, resource, coupling, wear, reliability, chrome plating, current density.

**Submitted 01.12.2019, revised 21.02.2020.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

**AKNOWLEDGEMENTS.** The authors express their gratitude to V.I. Dranenko, the Director of the "Communal DorServis", for providing a platform of the research data manual in the enterprise and providing materials for research of the road-building machinery and specialized vehicles. Also thanks to the Ministry of Economic Development of the PMR for funding the "Renovation of machinery and equipment" research laboratory in the Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko. Special thanks to the reviewers of the paper.

*For citation:* Kotomchin Aleksei N., Sinelnikov Anatoly F., Korneychuk Nikolai I. Restoration of machine parts: choice of the method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):84-97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

© Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Korneychuk N. I.



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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время увеличилась номенклатура марок и моделей автомобилей, эксплуатирующихся в России. На данный момент в России, как и в странах ближнего зарубежья, недостаточная производственно-технологическая база, которая могла бы обеспечить качественный ремонт автомобилей и агрегатов. Данная брешь привела к увеличению расходов на техническую эксплуатацию техники, так как всё время приходится собственными силами проводить ремонт на устаревшем, не отвечающем современным требованиям оборудовании, с использованием новых деталей, которые не всегда являются оригинальными (заводскими). При использовании неоригинальных деталей снижается ресурс агрегатов и автомобиля в целом, что приводит к частым простоям в ремонте, увеличивая тем самым себестоимость грузовых и пассажирских перевозок.

Известно, что повышение эффективности использования автомобилей и содержание их в работоспособном состоянии требует совершенствования ремонтно-обслуживающей базы путем увеличения мощностей и развития сети специализированных ремонтных предприятий по ремонту как отечественных, так и иностранных автомобилей, а также по восстановлению их оригинальных ресурсопределяющих деталей<sup>1</sup>.

Известно, что стоимость запасных частей в структуре себестоимости капитального ремонта машин достигает в целом 48–70%, которая увеличивается, как правило, с повышением конструктивной сложности машин (например, для КамАЗ-5540 – 60,6%, ГАЗ-3309 – 61,1%, мусоровоз Мерседес Бенц Есоpic – 66,2%) [1, 2]. Поэтому замена новых деталей на восстановленные детали позволит в значительной степени снизить себестоимость ремонта машин.

Восстановление изношенных деталей машин и оборудования — технически обоснованное и экономически оправданное мероприятие. Оно позволяет предприятиям, эксплуатирующим и обслуживающим автомобили, сокращать время простоя на устранение

неисправной техники, повышать качество её технического обслуживания и ремонта, положительно влиять на улучшение показателей надежности в процессе технической эксплуатации автомобилей.

Также обосновывается целесообразность организации работ по восстановлению и упрочнению деталей снижением себестоимости и повышением ресурса отремонтированных как агрегатов, так и машин в целом за счет сокращения затрат на приобретение новых запасных частей и сокращения производственных расходов при эксплуатации машин на предприятиях [2].

Исследования В.И. Черноиванова состояния качества деталей ремонтируемых машин<sup>2</sup> [3] позволили установить, что во многих случаях доля одноименных деталей, годных для дальнейшей эксплуатации без ремонта, составляет 20–45%; подлежащих ремонту и восстановлению – 40–60%, не пригодных для восстановления – 9–20%. Данная статистика характеризует качество базовых и корпусных деталей (включая блоки и головки цилиндров, коленчатые валы, шатуны, корпуса водяных насосов и другие детали), что свидетельствует о высокой интенсивности их замены.

С другой стороны, значительные объемы ремонтного фонда деталей содержат большое количество остаточного общественного труда, пренебрегать которым в условиях острого дефицита многих оригинальных запасных частей считается нецелесообразным.

По данным<sup>3</sup>, при восстановлении деталей число операций сокращается в 5–8 раз, а расход металла и материалов в 20–30 раз по сравнению с изготовлением новых.

Увеличение объемов восстановления деталей в условиях России позволит существенно снизить затраты на приобретение запасных частей, а следовательно и себестоимость ремонта машин. Данная стратегия обоснована отсутствием централизованных поставок оригинальных запасных частей, увеличенным количеством контрафактных деталей машин, отсутствием достаточного финансирования на снабжение и покупку новых деталей, у ко-

<sup>1</sup> Черноиванов В. И. Восстановление деталей машин (состояние и перспективы). М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 376 с.

<sup>2</sup> Поддержание и восстановление работоспособности строительных и дорожных машин с учетом их наработки с начала эксплуатации: отчет о НИР / Белорусско-Российский университет; рук. темы А.Н. Максименко. Могилев, 2010. 60 с. № ГР 20100278.

<sup>3</sup> Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. Мн.: УП «Технопринт», 2000. 268 с.

торых стоимость высокая из-за логистических проблем<sup>4</sup>.

Объективной необходимостью организации работ по восстановлению особенно ресурсоопределяющих изношенных деталей является потребность обеспечения высокого качества отремонтированной техники. Для этого необходимо восстановить их геометрические параметры с обеспечением заданного ресурса. Так, по двигателям внутреннего сгорания – это блоки и головки цилиндров, коленчатые и распределительные валы, шатуны. По шасси – несущие элементы, корпуса трансмиссии, детали ходовой части. По деталям машин, работающих при гидроабразивном изнашивании, – золотники, корпуса золотников, плунжера и т.д.<sup>5</sup>.

При ремонте и восстановлении деталей может производиться их модернизация: улучшаться геометрия посадочных и сопрягаемых деталей; повышаться твердость и износостойкость рабочих поверхностей путем наплавки, напыления, нанесения гальванических, полимерных покрытий, что позволит достигать не только исходного ресурса деталей, но и превышать его<sup>6</sup>.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обоснованию выбора рационального способа восстановления изношенных деталей машин посвящено множество работ. Так, П.И. Згирский предлагает определять эффективность восстановления деталей машин по формуле:

$$Z_v = \frac{C_e}{T_e} \leq Z_n = \frac{C_n}{T_n}, \quad (1)$$

где  $Z_n$ ,  $Z_e$  – удельные стоимостные измерители новых и восстановленных деталей на единицу ресурса, руб./ед. ресурса;  $C_n$  – цена новой детали, руб.;  $C_e$  – оптовая цена восстановленной детали, руб.;  $T_n$  – ресурс новой детали, мото-час, км, усл. га и т. д.;  $T_e$  – ресурс восстановленной детали, мото-час, км, усл. га и т.д.

А.С. Лебедев, Р.М. Петухов и М.Я. Шухгалтер рекомендуют определять эффективность восстановления деталей, пар трения оценивать по формуле:

$$\frac{C_{в.в} + C_{в.п} \leq C_{и.в} + C_{и.п}}{K_v}, \quad (2)$$

где  $C_{в.в}$ ,  $C_{в.п}$  – себестоимости восстановления вала и подшипника, руб.;  $C_{и.в}$ ,  $C_{и.п}$  – себестоимости изготовления сопряжения, руб.;  $K_v$ ,  $K_n$  – коэффициенты износостойкости деталей сопряжения.

В работе [4] рекомендуют оценивать эффективность восстановления деталей по формуле

$$\frac{C_e + E_n \cdot K_{y\partial} \leq C_n}{T_e} \leq \frac{C_n}{T_n}, \quad (3)$$

где  $C_e + E_n \cdot K_{y\partial}$  – полные затраты производства на восстановление детали, руб.;  $C_e$  – себестоимость восстановленной детали, руб.;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K_{y\partial}$  – удельные капитальные вложения;  $C_n$  – цена новой детали, руб.;  $T_e$ ,  $T_n$  – срок службы восстановленной и новой детали, мото-час.

Из приведенных методик ни одна по существу не связывает ресурсы восстановленных деталей с нормативными ресурсами. Анализ этих формул показывает, что имеется сколько угодно вариантов восстановления деталей, когда при малом значении  $C_e + E_n \cdot K_{y\partial}$  можно получить также малое значение себестоимости восстановленной детали  $C_e$ . При этом левая часть уравнения (3) будет меньше правой. Следовательно, имеет место множество решений, когда будет считаться, что восстановление эффективно, а на самом деле оно может быть неэффективным из-за многих как технических, так и экономических проблем.

Для того чтобы избежать данных ошибок, нужно в формулы вводить ограничивающие решения слева, т. е. преобразовать их в вид

$$C_n > C_v + E_n \cdot K_{уд}. \quad (4)$$

При этом

$$\frac{T_e}{T_n} \geq k_p^H, \quad (5)$$

где  $k_p^H$  – нормативный коэффициент восстановления ресурса детали.

<sup>4</sup> Пантелеенко Ф.И. и [др.]. Восстановление деталей машин. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

<sup>5</sup> Носенко А.С., Домницкий А.А. Исследование надежности и совершенствование конструкций контейнерных мусоровозов // Погрузочно-транспортные, строительно-дорожные и коммунальные машины. Технический сервис и конструкции : сб. науч. тр. Шахтинский ин-т ЮРГТУ. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2004. С. 19–24.

<sup>6</sup> Носенко А.С., Домницкий А.А. Исследование надежности и совершенствование конструкции контейнерных мусоровозов // Там же. С. 19–24.

Введение данного условия необходимо для того, чтобы в производство внедрить технологические процессы восстановления, не обеспечивающие восстановление заданных ресурсов. Например, коэффициент ресурса гильзы должен быть установлен не менее 0,6<sup>7</sup>.

Было принято, что в составе отремонтированных (в текущем или капитальном ремонте) машин и механизмов могут одновременно присутствовать новые, восстановленные и частично изношенные детали, но годные к дальнейшей эксплуатации. Точность работы механизмов таких машин определяют допусками на размеры, формы, взаимные расположения поверхностей новых, восстановленных деталей и допускаемыми износами для деталей, бывших в эксплуатации, но годных для дальнейшей работы. Долговечность же регламентируют в основном долговечностью восстановленных деталей, сопряжений и остаточными ресурсами составных частей, бывших в эксплуатации. Следовательно, межремонтные сроки, нормы расхода сменных деталей в процессе эксплуатации меняются. Так, например, анализ изменения ресур-

сов гильз цилиндров, поршней, поршневых пальцев, шестерен коробки передач тракторов показал, что ресурсы деталей двигателя и трансмиссии за нормативный срок службы машин сокращаются более чем в три раза<sup>8</sup>. Также меняется и расход деталей на ремонт, и техническое обслуживание. Обычно расход деталей в начале эксплуатации относительно невелик, но по мере увеличения наработки он возрастает, превышая первоначальное значение в несколько раз [4].

В результате исследований было получено, что при смене деталей в процессе эксплуатации и последовательном ремонте (текущем и капитальном) машин изменяются не только средние значения ресурсов, но и их рассеивание (рисунок 1), характеризуемое коэффициентом вариации. Эта величина – функция многих переменных факторов: состояния машин, поступивших на ремонт технического и организационного уровня ремонтного производства; вида ремонта; режима заводских испытаний и эксплуатационной обкатки; качества запасных частей и восстановленных деталей.

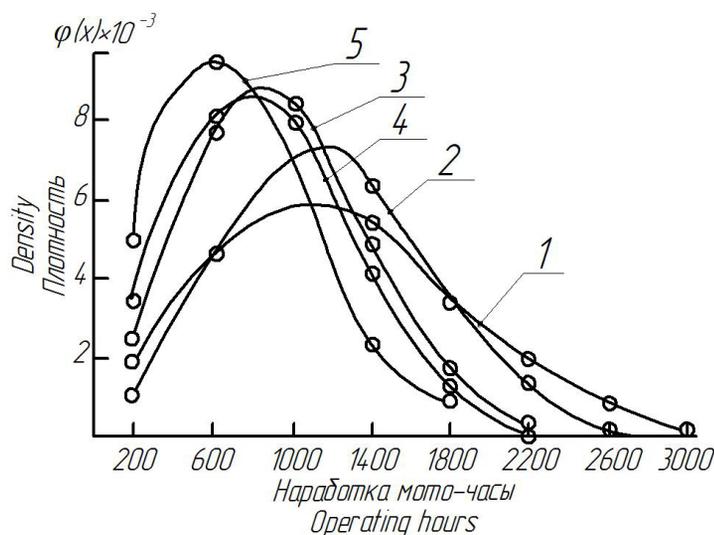


Рисунок 1 – Распределение ресурсов последовательно состоянию детали: 1, 2, 3, 4 и 5 – ресурсы детали после первой, второй, третьей, четвертой и пятой замен<sup>9</sup>

Figure 1 – Allocation of resources according to the part's state: 1, 2, 3, 4 and 5 – resources of the part after the first, second, third, fourth and fifth replacements<sup>9</sup>

<sup>7</sup> Косинова М.С., Косинова М.С. Проблемы организации технического обслуживания и ремонта машин для сбора и вывоза твердых бытовых отходов // Исследования в области конструирования, рабочих процессов и эксплуатации технологических машин: сб. науч. тр./ Шахтинский ин-т (филиал) ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск : УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2006. С. 99–104.

<sup>8</sup> Исследования в области конструирования, рабочих процессов и эксплуатации технологических машин: сб. науч. тр. Шахтинский ин-т (филиал) ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск : УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2004. С. 99–104.

В таблице 1 приведены данные по рассеиванию ресурсов агрегатов автомобилей после ремонта (данные М.Г. Корогодского и З.В. Потиевского<sup>9</sup>).

Таблица 1  
Рассеивание ресурсов агрегатов автомобилей

Table 1  
Dispersion of the car units' resources

Агрегаты	До первого капитального ремонта		Между капитальными ремонтами	
	размер партии	коэффициент вариации	размер партии	коэффициент вариации
Двигатель ЗМЗ-53	221	0,34	862	0,70
Двигатель ЗИЛ-130	62	0,24	614	0,75
Коробка передач ГАЗ-53	216	0,37	276	0,84
Задний мост ЗИЛ-130	95	0,33	147	0,76

Многолетние наблюдения за отремонтированными машинами и анализ их работы позволили установить средние значения коэффициентов вариации ресурсов деталей и коэффициенты восстановления ресурсов сменных деталей (таблица 2).

Таблица 2  
Коэффициенты вариации и восстановления ресурсов сменных деталей

Table 2  
Coefficients of variation and resource recovery of replacement parts

Элементы конструкции	Коэффициент вариации	Коэффициент восстановления ресурса сменных деталей	
		существующий	для проектирования
Детали гильзо-поршневой группы двигателей	0,3	0,6	0,8
Коленчатый вал	0,4	0,6	0,8
Звенья гусениц (по излому)	0,6	0,9	0,9
Корпусные детали	0,6	0,7	0,9
Шлицевые детали	0,5	0,7	0,8

Как следует из таблицы 2, межремонтные коэффициенты вариации ресурсов деталей значительно отличаются от доремонтных ресурсов по изложенным выше причинам. Следовательно, при нормировании коэффициентов восстановления ресурсов данных деталей нужно сопоставлять ресурс восстановленной детали, поставленной в новый агрегат, с ресурсом новой детали или ресурс новой детали, поставленной в отремонтированный агрегат, с ресурсом восстановленной детали, поставленной также в отремонтированный агрегат. Без этого можно допустить серьезную ошибку

при оценке качества восстановленных деталей. Значительное влияние на ресурс такой детали оказывает то, в каком сочетании она ставится в сборочную единицу или агрегат.

В процессе ремонта восстановленные поверхности деталей могут сопрягаться как с новыми, так и с восстановленными поверхностями, с допустимыми при ремонте размерами. Исследования [4], проведенные для различных вариантов сочетания сопряжений, показали, что постановка в сборочную единицу новой детали с бывшей в эксплуатации снижает ресурс сопряженных деталей на 11,0–56,4%.

<sup>9</sup>Корогодский М.В., Потиевский З.Л. Анализ влияния качественных факторов на показатели надежности. «Надежность и контроль качества», Киев, 1969, № 10.

Наибольшую скорость износа имеют сопряжения, собранные из новых (или восстановленных) деталей и деталей, параметры которых близки к выбракованным. Поэтому оценку эффективности восстановленных деталей по рекомендациям академика А.И. Черноиванова предпочтительно проводить по преобразованной формуле:

$$\frac{(C_{в.в}+E \cdot K_{уд})+(C_{в.п}+E \cdot K_{уд})}{k_c \cdot T_n} \leq \frac{L_{н.в}+L_{н.п}}{T_n}, \quad (6)$$

где  $k_c = T_g/T_n$  – коэффициент восстановления ресурса сопряжения.

Нужно иметь в виду, что коэффициенты восстановления ресурса сопряжений должны быть определены для случаев, когда условия работы новой и восстановленной детали сопоставимы.

Так долговечность зависит от скорости или интенсивности изнашивания (ГОСТ 23.002–98). Тогда в формулу (6) вместо ресурса можно ввести, например, интенсивность износа, а критерием оценки восстановления ресурса сопряжения будет являться относительная износостойкость сопряжения. При этом необходимо помнить, что износ различных сопряжений зависит от изменения их пространственного положения и формы.

Ресурсы деталей или сопряжений определяют по данным эксплуатационных наблюдений или испытаний. По этим данным могут быть рассчитаны функции плотности распределения наработки деталей и определены показатели надежности деталей; вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс и т.п.

Известно, что повышение качества и снижение себестоимости ремонта машин тесно связано с применением восстановленных деталей, благодаря чему объемы восстановления деталей будут возрастать. Это приводит к тому, что надёжность восстановленных деталей становится одним из важнейших факторов, формирующих качество отремонтированных машин в целом. Также один из важнейших показателей качества восстановленной детали – стабильность конструктивно-технологических характеристик и точность параметров. В свою очередь стабильность характеристик детали зависит от выбора способа восстанов-

ления. В практике восстановления деталей на качество параметров ее восстановления мало обращают внимания и в расчетах эффективности восстановления не учитывают. Более того, как правило, оценку износостойкости даже новых деталей проводят по ее среднему значению, испытывая при этом не более трех деталей. Тем самым допускают существенную ошибку в оценке качества. При оценке эффективности восстановления не всегда учитывается качество восстановления деталей.

Поэтому при производстве современных автомобилей возникает необходимость расширения научно-исследовательских работ, связанных с разработкой и внедрением технологических процессов упрочнения и восстановления деталей имея в виду, что срок службы восстановленных должен составлять не менее 80% срока службы новых таких деталей [5].

Одним из перспективных направлений в развитии ремонтного производства является применение гальванических способов восстановления изношенных деталей машин. Этому способствует современная тенденция уменьшения величины предельных износов сопряжений деталей, благодаря неуклонному совершенствованию машиностроительных конструкций. Так, по данным ГОСНИТИ (ВИМ) и некоторых исследователей [6], в настоящее время у большинства автотракторных деталей, поступающих в ремонт, износ поверхностей трения составляет 0,1...0,5 мм. Многочисленными исследованиями доказано, что экономически целесообразно наращивать электролитическими покрытиями слой металла от нескольких микрометров до 0,5 мм, такие как хромирование, железнение, никелирование, цинкование, кадмирование и др.

Известно, что наиболее высокими физико-механическими и химическими свойствами (твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и др.) обладают хромовые покрытия, а хромированные детали – повышенной надёжностью<sup>10</sup>.

Однако существующая технология восстановления автотракторных деталей хромированием в универсальном электролите до настоящего времени не получила широкого распространения в ремонтном производстве из-за следующих причин: низкой производи-

<sup>10</sup> Петров Ю.Н., Малянов В.Н., Корнейчук Н.И. Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинев: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М.В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.

тельности процесса (25...60 мкм/час); низкого выхода хрома по току (12–16%); малой толщины качественного слоя осадка (до 0,2 мм); высокой токсичности, агрессивности и неустойчивости состава в растворе и др. Поэтому в ремонтном производстве восстановлению хромированием подвергают узкую номенклатуру наиболее ответственных деталей, работающих в условиях высокой температуры и недостаточной смазки [7, 8].

Изыскание условий электролиза, позволяющих повысить производительности и экономичности процесса хромирования, получение большей толщины наращиваемого слоя качественных осадков хрома, а также улучшение условий труда при обслуживании ванн хромирования является актуальной проблемой ремонтного производства.

По вопросам рационального использования электролитического хрома в машиностроении и ремонтном производстве посвящены работы Ю.Н. Петрова, В.И. Лайнера, Н.Т. Кудрявцева<sup>11</sup> и др.

Авторами [9, 10, 11, 12] выявлено, что при применении хромовых покрытий увеличиваются межремонтные сроки службы автомобилей, тракторов, железнодорожного транспорта, судовых и тепловозных двигателей, станочного оборудования и значительно улучшаются технико-экономические показатели машин. Номенклатура деталей автомобилей и тракторов, восстанавливаемых хромированием, постоянно расширяется.

По данным исследований [13], хромирование цилиндров повышает пробег между заменами гильз в 2 раза и уменьшает износ колец в 2-3 раза даже в условиях использования горюче-смазочных материалов с повышенным содержанием серы.

Срок службы хромированных валов (коренных и шатунных шеек) увеличивается в 3–5 раз, а у высокооборотных малолитражных двигателей – до 10 раз [13].

В исследованиях Ю.Н. Петрова приводятся данные о повышении износостойкости коленчатых валов автотракторных двигателей в 4–10 раз по сравнению с нехромированными.

По проведенным исследованиям М.П. Стратулат [13], хромированные прецизионные детали топливных насосов с хромированными плунжерами работали в течение 4 сезо-

нов. Детали серийного производства за это время были заменены 2–3 раза. Если учесть, что сталь ХВГ, применяемая для изготовления плунжеров, относится к дорогостоящим и труднообрабатываемым материалам, то замена ее углеродистой сталью 45 может иметь дополнительную экономию.

Авторы А.Н. Котомчин, Е.Ю. Ляхов также считают, что восстановление деталей работающих при гидроабразивном изнашивании (плунжера, золотники и др.) хромированием экономически целесообразно. Ускоренные лабораторные испытания и опыт эксплуатации показывают, что среди всех способов восстановления плунжерных пар, золотников гидрораспределителей хромирование занимает ведущее место по надежности отремонтированных деталей [14].

Однако производительность процесса хромирования – выход хрома по току и скорость наращивания слоя – не удовлетворяет возросшие требования производства на современном уровне развития машиностроения и ремонта. Поэтому наряду с хромированием разработаны и совершенствуются другие более высокопроизводительные и экономичные гальванические процессы, среди которых (с точки зрения ремонтного производства) наибольшее внимание привлекает железнение и сплавы на его основе [15]. Тем не менее интенсификация процесса хромирования и улучшение физико-механических свойств хромовых покрытий является актуальной проблемой ремонтного производства. Её решение затрудняется вследствие специфики катодного процесса при электролизе хромовокислых растворов, выяснение которой составляет сложную задачу электрохимии [16]. До конца неясен вопрос о природе переноса электронов из металла к отрицательно заряженным хромат-ионам, какая роль обильно выделяющегося водорода на катоде в общей реакции восстановления хромовой кислоты, почему возможна реакция полного восстановления хромат-ионов только в присутствии посторонних кислотных радикалов и др.

За прошедшие два десятилетия теория электролитического осаждения хрома получила дальнейшее развитие и накоплен богатый опыт его практического применения, что обуславливает возможность значительной ин-

<sup>11</sup> Петров Ю.Н., Малянов В.Н., Корнейчук Н.И. Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинев: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М.В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.

тенсификации процесса хромирования и улучшения физико-механических свойств осадков [17, 18, 19, 20].

По мнению М.А. Шлугера, Ю.Н. Петрова, Н.Т. Кудрявцева<sup>12</sup> развитие и совершенствование электролитического хромирования должны осуществляться по двум основным направлениям:

1. Совершенствование существующих и изыскание новых электролитов, обеспечивающих получение хромовых покрытий более высокого качества.

2. Совершенствование существующих и изыскание новых технологических приемов электроосаждения хрома, обеспечивающих повышение производительности процесса и улучшение его физико-механических свойств.

В результате выше изложенных материалов по использованию хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин был выявлен ряд недостатков, которые предлагаются решить использованием холодного саморегулирующегося электролита хромирования, разработанного учеными Кишиневского сельскохозяйственного института (ныне Аграрного университета Молдовы) [21]. Он отличается высокой рассеивающей способностью и производительностью процесса, повышенной стабильностью в широком диапазоне рабочих плотностей тока и малой агрессивностью. Данный электролит обеспечивает нанесение качественных, износостойких покрытий со скоростью 0,20–0,70 мм/ч в широком диапазоне плотностей катодного тока (75–300 А/дм<sup>2</sup>), с максимальным значением выхода металла по току (до 40±1%), микротвердостью покрытий до 9000±200 МПа и практически не изменяется с неизменяющимися по толщине физико-механическими свойствами покрытия.

Однако данный электролит обладает недостатком – малый диапазон рабочих температур (18–23 °С), при которых можно получить качественные покрытия, требует использовать мощные холодильные установки, что затрудняет его промышленное внедрение.

Для решения данной проблемы в научно-исследовательской лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко проводились исследования по оптимизации состава существующего холодного саморегулирующегося электролита с целью расширения диапазона рабочих температур

процесса электролиза, с сохранением производительности гальванической ванны.

Исследования проводились в ванне емкостью 2 л с использованием следующего оборудования и приборов: источник постоянного тока (трёхфазный выпрямитель), бак для поддержания температуры в ванне с электролитом, пусковая, регулировочная и контрольно-измерительная аппаратура, ванна для электрохимического травления поверхностей образцов (деталей) перед хромированием. Хромовые покрытия наносились на образцы, изготовленные из стали 45 диаметром 12 мм, длиной 10, 13, 20 мм: площадью 0,0375 и 0,05 дм<sup>2</sup> – для определения выхода хрома по току; площадью 0,075 см<sup>2</sup> – для измерения микротвердости осадков при толщине покрытия 100 ± 5 мкм.

Перед хромированием все образцы тщательно обезжиривались венской известью, промывались проточной, а затем дистиллированной водой и взвешивались с точностью до 0,0001 г. Затем они закреплялись в специальной подвеске, повторно обезжиривались венской известью, промывались и завешивались в ванну хромирования.

При отработке оптимального состава электролита концентрация хромового ангидрида изменялась от 250 до 450 г/л, через 50 г/л; количество углекислого кальция – 40–80 г/л, через 5 г/л (в растворе с концентрацией CrO<sub>3</sub> – 400 г/л и температуре 20±0,5 °С); также было предложено заменить более дорогой сернокислый кобальт на менее сернокислый никель, который добавлялся в количестве 12–20 г/л, через каждые 2,5 г/л.

Влияние температуры на выход хрома по току и микротвердость покрытий, полученных в оптимальном составе электролита, изучалось в интервале от 20 до 35 °С, через 2,5... 5 °С.

В оптимальный состав электролита вводилась неорганическая добавка *БПФК-19* следующей концентрации, г/л: 0,5...5.

Катодная плотность ( $D_k$ ) тока изменялась от 10 А/дм<sup>2</sup> до предельно допустимой, через разные интервалы: 10, 15, 30 и 60 А/дм<sup>2</sup> (по необходимости). За предельно допустимую плотность тока принималась та, при которой появлялось местное растрескивание и отшелушивание осадков на образцах в 4–5 опытах.

<sup>12</sup> Кудрявцев В.Н., Солодкова Л.Н. Электролитическое хромирование. М.: Глобус, 2007. 193 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования нового состава электролита показали, что при электролизе постоянным током замена сернокислого кобальта сернокислым никелем обусловила не только повышение выхода хрома по току, но и возможность хромирования при более высоких рабочих температурах (рисунок 2).

В состав электролита исследования вошли следующие составляющие: хромовый ангидрид ( $\text{CrO}_3$ ) 400 – 420 г/л, углекислый кальций ( $\text{CaCO}_3$ ) 50 – 52 г/л, сернокислый никель ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 16 – 18 г/л, неорганическая добавка БПФК-19 0,7 – 1,0 г/л.

В результате электролиза в диапазоне рабочих температур 25 – 35 °С, плотности тока  $D_k$  в пределах от 50 до 150 А/дм<sup>2</sup> наблюдались постоянные значения выхода хрома по току (40±1%), а микротвердость осадков составляла 850 – 930 кг/мм<sup>2</sup>. Скорость осаждения хро-

ма при этом в зависимости от  $D_k$  изменялась в пределах от 100 до 350 мкм/час (рисунок 2).

Результатом изучения трещиноватости и определения микротвердости осадков по толщине подвергалось поперечное сечение средней части образцов. После механической обработки шлифы протравливались по известной методике. Микроструктура шлифов изучалась на металлографическом микроскопе ММУ-3 с цифровым окуляром (с увеличением 2,08х) при 250, 625 и 1000-кратном увеличении. Микротвердость измерялась по толщине слоя в радиальном направлении.

Металлографическими исследованиями установлено, что осадкам хрома, полученным предлагаемым способом в диапазоне  $D_k = 75 \dots 150$  А/дм<sup>2</sup>, присуща трещиноватость (рисунок 3). Все трещины, наблюдаемые по всему поперечному сечению покрытия, микроскопические, ориентированные в большинстве случаев в радиальном направлении.

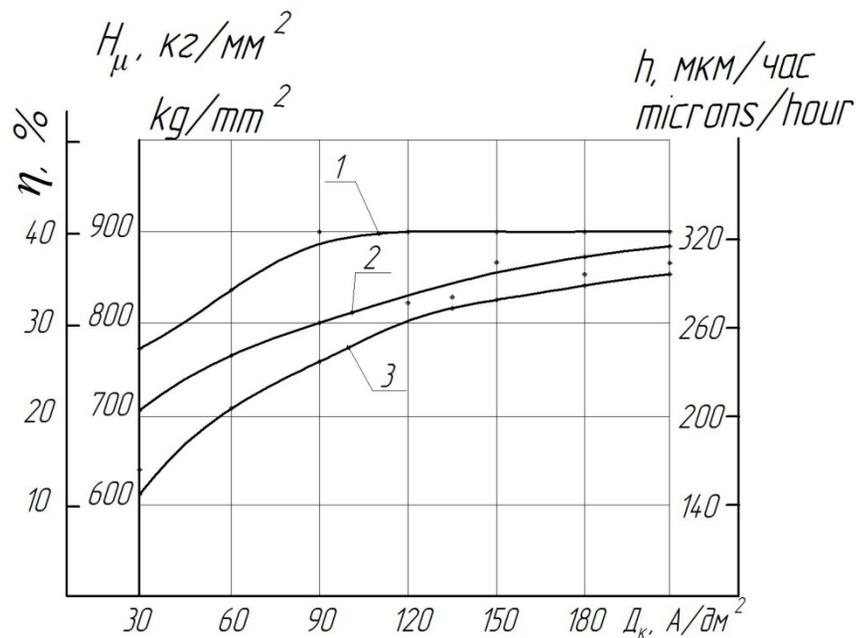


Рисунок 2 – Влияние катодной плотности постоянного тока на выход хрома по току – 1, микротвердость покрытий – 2 и скорость их осаждения – 3 в электролите с ионами никеля и неорганической добавки БПФК-19 при температуре 25–35 °С

Figure 2 – Influence of DC cathode density on chromium current output – 1, coating microhardness – 2 and deposition rate – 3 in electrolyte with Nickel ions and inorganic additive BPFC-19 at temperature of 25–35 °C

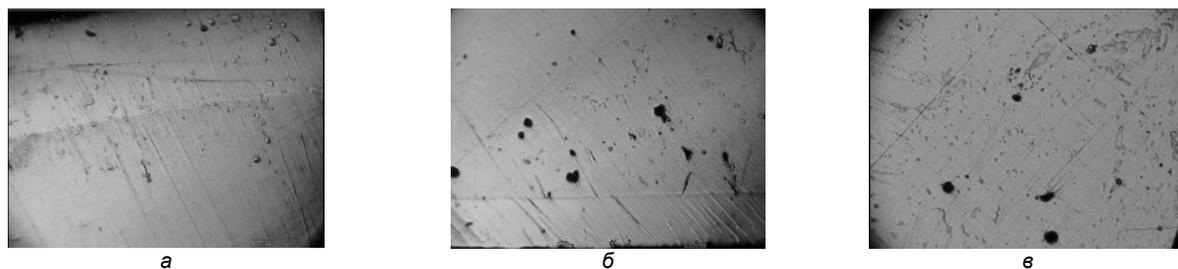


Рисунок 3 – Микрошлифы хромовых покрытий, полученных при электролизе постоянным током в электролите с ионами  $Ni^{2+}$ , при 625-кратном увеличении: а –  $D_k=75$  А/дм<sup>2</sup> при толщине осадка 140 мкм; б –  $D_k=100$  при толщине осадка 200 мкм; в –  $D_k=150$  при толщине осадка 250 мкм

Figure 3 – Microscopes of chrome coatings obtained by direct current electrolysis in an electrolyte with  $Ni^{2+}$  ions at 625x magnification: а –  $D_{k=75}$  A/dm<sup>2</sup> at a thickness of 140 microns; б –  $D_{k=100}$  A/dm<sup>2</sup> a thickness of 200 microns; в –  $D_{k=150}$  A/dm<sup>2</sup> of the 250 microns thickness

Глубина дефектов (за редким исключением) 5...20 мкм. Только у подложки трещины либо отсутствуют, либо их по всему периметру незначительное количество.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого анализа выбора способа восстановления деталей автомобилей можно заключить следующее: в результате совершенствования производства деталей машин улучшения качества материалов и покрытий сопрягаемых деталей, уменьшения допусков при изготовлении деталей снижается величина предельного износа деталей.

Так как многие ресурсопределяющие детали машин имеют износы в пределах 0,1...0,5 мм, появляется возможность использовать хромирование, при упрочнении и восстановлении. Однако хромирование имеет ряд проблем при использовании из-за низкой производительности процесса, возможной максимальной толщиной покрытия и технологических сложностей организации процесса.

Поэтому для решения данной проблемы проведены исследования по оптимизации состава существующего холодного саморегулирующегося электролита хромирования, которые позволяют расширить диапазон рабочих температур до 35 °С без снижения производительности и качества хромового покрытия, что в свою очередь даёт возможность внедрения его в производство.

Также была изучена микроструктура покрытых образцов, которая показала, что осадки

имеют минимальное количество микротрещин как снаружи, так и вдоль слоя по толщине. В результате чего возможно использовать данный электролит при восстановлении деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании (золотники, плунжера и т.д.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 403–408.
2. Густов Ю.И. Исследование конструктивно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Известия КГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 470–475.
3. Мухаметшина Р.М. Трибологические отказы дорожно-строительных машин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 18. 2016. № 1(2). С. 252–255.
4. Котомчин А.Н., Корнейчук Н.И. Влияние условий эксплуатации дорожно-строительных машин и специализированного автотранспорта на ресурс их узлов и агрегатов // Технический сервис машин. 2019. № 2 (135). С. 135–142.
5. Котомчин А.Н., Ляхов Е.Ю. Восстановление деталей узлов и агрегатов техники, работающих при гидроабразивном изнашивании // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 5. С. 8–12.
6. Корнейчук Н.И., Лялякин В.П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2018. № 130. С. 254–265.
7. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018

годы // Гальванотехника и обработка поверхности. Том 27. 2019. № 3. С. 4–14.

8. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2016–2017 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. Том 26. 2018. № 1. С. 4–10.

9. Bolch T., Linde R., Metzner M., Müll K. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // *Galvanotechnik*. 2005. № 103. pp. 2095–2100.

10. Distelrath A. Jakob, C. Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings // *Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future*. Ilmenau: 2009. pp. 379.

11. Distelrath-Lübeck A. Untersuchung des Einflusses von Methansulfonsäure auf die Chromabscheidung aus Chromsäure-elektrolyten // *Galvanotechnik*. 2011. № 102. pp. 2647–2657.

12. Metzner M., Bolch T., Linde R., Müll K. Nasse Kombinationen – Funktionelle Oberflächen durch elektrochemische In-situ-Strukturierung // *Metalloberfläche*. 2003. № 57. pp. 18–22.

13. Стратулат М.П. Восстановление деталей машин электрохимическим хромированием: монография. Орел: ОрелГТУ, 2009. 246 с.

14. Графушин Р.В., Винокуров Е.Г., Махина В.С., Бурухина Т.Ф. Электроосаждение и физико-механические свойства композиционных покрытий на основе хрома с различными модификациями углерода // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2018. № 2 (26). С. 26–32.

15. Смирнов К.Н., Архипов Е.А., Кравченко Д.В. К вопросу о кроющей способности электролитов // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2015. № 3 (23). С. 30–34.

16. Шишурин С.А., Семочкин В.С., Сафонов В.В., Гурьев А.Е. Структура и физико-механические свойства композиционных гальванохимических покрытий // *Вестник АПК Ставрополя*. 2014. № 3. С. 77–80.

17. Кругликова Е.С., Кругликов С.С., Некрасова Н.Е. О микрорассеивающей способности электролитов хромирования // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2016. № 3 (24). С. 4–9.

18. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В. Влияние условий электролиза на рассеивающую способность электролитов хромирования // *Изв. вузов: Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52. № 6. С. 54–57.

19. 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*. М. 2004. Т. 18. С. 42–44.

20. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В., Шувакин А.Е. Прогнозирование равномерности осаждения гальванических покрытий // *Изв. вузов: Химия и химическая технология*. 2007. № 3. С. 103–107.

21. Корнейчук Н.И., Ковбасюк А.В., Лисник А.В. Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // *Труды Кишиневского СХИ*. 1975. № 144. С. 17–23.

## REFERENCES

1. Muhametshina R.M. Otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin po parametram korrozii [Failure of road-building machine according to the parameters of corrosion]. *Izvestija KGASU*. 2013; 4 (26): 403–408 (in Russian).

2. Gustov Ju.I. Issledovanie konstrukcionno-technologicheskikh i jekspluacionnyh pokazatelej stroitel'noj tehniki [Research of construction-technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestija KGASU*. 2014; (30): 470–475 (in Russian).

3. Muhametshina R.M. Tribologicheskie otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin [Tribological failures of road construction machines]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2016; T.18, No 1(2): 252–255 (in Russian).

4. Kotomchin A.N., Kornejchuk N.I. Vlijanie uslovij jekspluacii dorozhno-stroitel'nyh mashin i specializirovannogo avtotransporta na resurs ih uzlov i agregatov [Influence of operating conditions of road construction machines and specialized vehicles on the resource of their components and aggregates]. *Tehnicheskij servis mashin*. 2019; 2 (135): 135–142 (in Russian).

5. Kotomchin A.N., Ljahov E.Ju. Vosstanovlenie detalej uzlov i agregatov tehniki, rabotajushhij pri gidroabrazivnom iznashivanii [Restoration of parts and units of equipment operating under waterjet wear]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija*. 2019; 5: 8–12 (in Russian).

6. Kornejchuk N.I., Ljaljakin V.P. Perspektivy ispol'zovanija industrial'nyh metodov vosstanovlenija iznoshennyh detalej mashin gal'vanicheskimi i polimernymi pokrytijami v sovremennyh uslovijah razvitiya agropromyshlennogo tehnicheskogo servisa [Prospects for using industrial methods for restoring worn machine parts with galvanic and polymer coatings in modern conditions of the agricultural technical service]. *Trudy GOSNITI*. 2018; 130: 254–265 (in Russian).

7. Elinek T.V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2017–2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2019; T. 27, No. 3: 4–14 (in Russian).

8. Elinek T.V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2016–2017 gody [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2016–2017]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2018; 26. No. 1: 4–10 (in Russian).

9. Bolch T., Linde R., Metzner M., Müll, K. *Innovative surface structures through electrochemical coating processes*. *Galvanotechnik* 103 (2005): 2095–2100.

10. Distelrath, A.; Jakob, C. *Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings. In: Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future.* Ilmenau: 2009: 379.

11. Distelrath-Lübeck, A. Study of the influence of Methanesulfonic acid on Chromium deposition from chromic acid electrolytes. *Electro Technology.* 2011; 102: 2647–2657.

12. Metzner, M., Bolch, T., Linde, R., Müll, K. Wet combinations-functional surfaces by electrochemical in-situ structuring. *Metal Surface.* 2003; 57. No. 9: 18–22.

13. Stratulat M.P. *Vosstanovlenie detalej mashin jelektrhimičeskim hromirovanjem: monografija.* [Restoration of machine parts by electrochemical chrome plating: monograph]. OrelGTU, Orel, 2009: 246 (in Russian).

14. Grafushin R.V., Vinokurov E.G., Mahina V.S., Buruhina T.F. Jelektroosazhdenie i fiziko-mehanicheskie svojstva kompozicionnyh pokrytij na osnove hroma s razlichnymi modifikacijami ugljeroda [Electrodeposition and physical and mechanical properties of chromium-based composite coatings with various carbon modifications]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti.* 2018; 2 (26): 26–32 (in Russian).

15. Smirnov K.N., Arhipov E.A., Kravchenko D.V. K voprosu o krojushhej sposobnosti jelektrolitov [On the question of the hiding power of electrolytes]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti.* 2015; 3 (23): 30–34 (in Russian).

16. Shishurin S.A., Semochkin V.S., Safonov V.V., Gur'ev A.E. Struktura i fiziko-mehanicheskie svojstva kompozicionnyh gal'vanohimičeskikh pokrytij [Structure and physical and mechanical properties of composite electrochemical coatings]. *Vestnik APK Stavropol'ja.* 2014; 3: 77–80 (in Russian).

17. Kruglikova E.S., Kruglikov S.S., Nekrasova N.E. O mikrorasseivajushhej sposobnosti jelektrolitov hromirovanija [On the micro-dispersing ability of chrome-plating electrolytes]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti.* 2016; 3 (24): 4–9 (in Russian).

18. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V. Vlijanie uslovij jelektroliza na rasseivajushhiju sposobnost' jelektrolitov hromirovanija [Effect of electrolysis conditions on the scattering capacity of chrome plating electrolytes]. *Izv. vuzov: Himija i himičeskaja tehnologija.* 2009; 52, No 6: 54–57 (in Russian).

19. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V. Osobennosti vlijanija temperatury na rasseivajushhiju sposobnost' jelektrolitov [Features of the temperature influence on the scattering capacity of electrolytes]. *SB. nauchnyh trudov: Uspehi v himii i himičeskoi tehnologii.* Moscow, 2004; 18: 42–44. (in Russian).

20. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V., Shuvakin A.E. Prognozirovanie ravnomernosti osazhdenija gal'vanicheskih pokrytij [Prediction of the uniformity of the galvanic coatings' deposition]. *Izv. vuzov: Himija i himičeskaja tehnologija.* 2007; 3: 103–107 (in Russian).

21. Kornejchuk N.I., Kovbasjuk A.V., Lisnik A.V. Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija [Influence of the concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of the cold chrome plating]. *Trudy Kishinevskogo SHI.* 1975: 144: 17–23 (in Russian).

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Котомчин Алексей Николаевич – Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи.*

*Синельников Анатолий Федорович – Общее руководство по подготовке статьи.*

*Корнейчук Николай Иванович – Методическое и научное сопровождение при подготовке статьи, получение достоверных результатов исследования и их подтверждение.*

## AUTHORS' CONTRIBUTION

*Aleksei N. Kotomchin – main work on research and collection of information.*

*Anatoly F. Sinelnikov – general guide to the preparation of the paper.*

*Nikolai I. Korneychuk – methodological and scientific support in the preparation of the paper; finding reliable research results and confirming them.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» МАДИ (125329, Россия, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, Москва), старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета. Т.Г. Шевченко, ORCID ID 0000-0002-4750-5255 (3300, Молдова, Приднестровье, Тирасполь, ул. 25 Октября, 128), e-mail: aleshka81@list.ru).*

*Синельников Анатолий Федорович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» МАДИ, ORCID ID 0000-0003-0398-4749 (125329, Россия, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, Москва), e-mail: sinelnikov46@inbox.ru).*

*Корнейчук Николай Иванович – канд. техн. наук, проф. кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт» ПГУ им. Т.Г. Шевченко, ORCID ID 0000-0002-6420-389X (3300, Молдова, Приднестровье, Тирасполь, ул. 25 Октября, 128, e-mail: n.corneiciuc@uasmd.md).*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Department of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles, Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI) (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave.), Senior Researcher of the Laboratory of the Renovation of Machinery and Equipment, Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko, ORCID ID 0000-0002-4750-5255 (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St., e-mail: aleshka81@list.ru).*

*Anatoly F. Sinelnikov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the*

*Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI), ORCID ID 0000-0003-0398-4749 (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave., e-mail: sinelnikov46@inbox.ru).*

*Nikolai I. Korneychuk – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of the Operation and Repair of Machinery and Tractor, Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko, ORCID ID 0000-0002-6420-389X (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St., e-mail: n.corneiciuc@uasm.md).*

УДК 656.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-98-109>

## НАДЕЖНОСТЬ И СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ НА ПЕРЕВОЗКИ ПАССАЖИРОВ В ГОРОДАХ С ГРАДООБРАЗУЮЩИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

**В.М. Курганов<sup>1</sup>, М.В. Грязнов<sup>2</sup>, К.А. Давыдов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь, Россия;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет», им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

<sup>3</sup>ООО «Автодоркомплект», г. Магнитогорск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье обоснована актуальность снижения затрат на регулярные пассажирские перевозки и повышение их надежности применительно к городам с градообразующими предприятиями. Раскрыта организационно-технологическая специфика регулярной маршрутной сети городского транспорта в таких городах. Предложен способ организации маршрутов регулярных перевозок, основанный на рациональном сочетании базовых маршрутов, предполагающих посадку и высадку пассажиров только на установленных остановочных пунктах, и резервных маршрутов с посадкой-высадкой пассажиров в любом не запрещенном правилами дорожного движения месте по маршруту движения. Оптимизация маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров осуществляется с использованием предложенной экономико-математической модели с учетом затрат на формирование инфраструктуры для организации движения транспорта по резервным маршрутам, эксплуатационных затрат на перевозку, а также затрат на ликвидацию сбоев в работе городского транспорта. Разработанная математическая модель оценки надежности регулярных перевозок пассажиров отличается от известных моделей тем, что учитывает наличие резервных маршрутов в регулярной маршрутной сети. Целесообразность практической реализации предлагаемых рекомендаций доказана на примере маршрутов транспорта общего пользования г. Магнитогорска.

**Материалы и методы.** Анализ научной и нормативно-правовой литературы, экономико-математическое моделирование транспортных процессов, методы расчета надежности технических и транспортных систем, статистический, системный и технико-экономический анализ.

### Результаты:

- обладающие научной новизной: оптимизационная экономико-математическая модель маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями, математическая модель оценки надежности регулярных перевозок пассажиров;

- имеющие практическую значимость: практические рекомендации по организации резервных маршрутов регулярных перевозок пассажиров на примере г. Магнитогорска.

**Обсуждение и заключение.** Реализация теоретических положений, математических моделей и рекомендаций, разработанных в ходе выполненных исследований, позволила получить новые научные результаты и эффект от их внедрения. На примере маршрутной сети г. Магнитогорска обосновано формирование дополнительного объема перевозок 178 тыс. пассажиров в год, увеличение скорости сообщения на 7 км/ч, снижение себестоимости перевозки одного пассажира на 7%, повышение ее надежности в 1,14 раза.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городской транспорт, регулярная маршрутная сеть, автобусный маршрут, надежность перевозок пассажиров, эффективность перевозки, резервирование, снижение транспортных издержек.

Поступила 20.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы благодарят научных сотрудников и специалистов-практиков, обсуждавших в формате научных конференций и семинаров результаты исследования на всех этапах его выполнения, а также рецензентов данной статьи за высказанные рекомендации и пожелания.

© Курганов В.М., Грязнов М.В., Давыдов К.А.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Курганов В.М., Грязнов М.В., Давыдов К.А. Надежность и снижение затрат на перевозки пассажиров в городах с градообразующими предприятиями. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1): 98-109. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-98-109>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-98-109>

## CITY-FORMING ENTERPRISES: RELIABILITY AND REDUCED COSTS OF THE PASSENGERS' TRANSPORTATION

Valery M. Kurganov<sup>1</sup>, Mikhail V. Gryaznov<sup>2</sup>, Kirill A. Davydov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tver State University, Tver, Russia;

<sup>2</sup>Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia;

<sup>3</sup>"Avtodorkomplekt" enterprise, Magnitogorsk, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper substantiates the relevance of reducing costs for regular passenger traffic and increasing their reliability in relation to cities with city-forming enterprises. The organizational and technological specificity of the regular route network of urban transport in such cities is disclosed. The authors propose a method for organizing regular transportation routes based on a rational combination of basic routes that require boarding and disembarking passengers only at stopping points and backup routes with boarding and disembarking passengers in any place not prohibited by the rules of road traffic. The authors demonstrate route network optimization of the regular passenger transportation using the proposed economic and mathematical model and taking into account the costs of forming the infrastructure for organizing traffic on backup routes, operating costs of transportation, as well as the cost of eliminating failures in urban transport. The developed mathematical model for assessing the reliability of regular passenger transportation differs from the well-known models, which take into account the availability of backup routes in the regular route network. The research proves the practical implementation of the proposed recommendations by the example of public transport routes in Magnitogorsk.

**Materials and methods.** The authors used the analysis of scientific and regulatory literature; economic and mathematical modeling of transport processes; methods for calculating the reliability of technical and transport systems; the statistical, technical and economic system analysis.

**Results.** As a result, the authors revealed the optimization of the economic and mathematical model of the regular passenger transportation in cities with city-forming enterprises and a mathematical model for assessing the reliability of regular passenger transportation. Moreover, the paper presented practical recommendations on the organization of reserve routes for regular passenger transport on the example of Magnitogorsk.

**Discussion and conclusions.** By the implementation of theoretical principles, mathematical models and recommendations developed in the course of the research, the authors show the effect of implementation and the possibility to obtain new scientific results. Moreover, the authors demonstrate the formation of an additional volume of traffic by 178 thousand passengers a year, an increase in the speed of communication by 7 km per hour, a decrease in the cost of transporting one passenger by 7% and an increase in reliability by 1.14.

**KEYWORDS:** urban transport, regular route network, bus route, reliability of passenger transportation, transportation efficiency, reservation, reduction of transport costs.

Submitted 20.01.2019, revised 21.02.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors express their gratitude to the researchers and practitioners, who discuss the results of the research in the format of scientific conferences and seminars, as well as to the reviewers of the manuscript for recommendations and suggestions.

For citation: Kurganov Valery M., Gryaznov Mikhail V., Davydov Kirill A. City-forming enterprises: reliability and reduced costs of the passengers' transportation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (1): 98-109. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-98-109>

© Kurganov V. M., Gryaznov M. V., K. A. Davydov



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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время научной и нормативно-справочной литературой не регламентировано понятие городов с градообразующими предприятиями. Несмотря на это данный термин активно употребляется в политической сфере, в научно-производственных кругах, в прессе. Авторы статьи под градообразующим предприятием понимают производственную организацию, в которой занята значительная часть трудоспособных жителей данного населенного пункта. Градообразующее предприятие ключевым образом определяет инфраструктуру и социальную сферу города или поселка. Если такое предприятие в населенном пункте единственное, то он является моногородом. Отличительными признаками городов с градообразующими предприятиями являются [1]:

- существенная зависимость доходной части городского бюджета от деятельности одного (нескольких) ключевых предприятий;

- однородность профессионального состава города и низкая диверсификация сфер занятости;

- наличие ряда технологически связанных предприятий, которые работают на один конечный рынок, за исключением предприятий, обслуживающих внутренние нужды города.

В российских городах с градообразующими предприятиями, включая моногорода, проживает 25%<sup>1</sup> всего населения страны. При этом общее число таких городов составляет треть от числа городов и поселков городского типа Российской Федерации<sup>2</sup>.

Градообразующее предприятие является центром притяжения массовых пассажиропотоков по маятниковому принципу. Направление пассажиропотока, его величина в разные периоды суток определяется ритмом функционирования градообразующего предприятия. Эта особенность обуславливает организационно-технологическую специфику регулярной маршрутной сети городского транспорта в городах с градообразующими предприятиями, состоящую в приоритетности обслуживания трудовых перемещений населения, низкой плотности в центральной части города и в не-

доступности удаленных городских районов. Как результат, действующая регулярная маршрутная сеть не может обеспечить приемлемый для граждан интервал движения транспорта в межпиковые периоды. Поэтому жители города для своих поездок часто выбирают личный автотранспорт, что вызывает снижение объема перевозок по регулярной маршрутной сети и утрату коммерческой привлекательности городского транспорта для бизнеса.

В современной отечественной и иностранной научной литературе предлагаются способы повышения эффективности пассажирских перевозок в городах за счет решения вопросов устойчивого развития городского транспорта [2, 3], повышения уровня информатизации транспортных процессов [4, 5, 6, 7], исследования предпочтений населения в выборе видов городского транспорта [8, 9, 10], формирования городской маршрутной сети [11, 12, 13], анализа функционирования автотранспортных компаний [14, 15, 16].

В настоящее время опубликовано большое число работ [17, 18, 19, 20], в которых предложен методический инструментарий оценки надежности транспортных процессов. Следует отметить, что предлагаемые методы расчета надежности различных объектов, включая технические и человеко-машинные системы, технологические процессы, цепи поставок, процессы грузовых и пассажирских перевозок имеют общую методологическую природу. В качестве примера работы, посвященной обоснованию справедливости данного утверждения, можно привести монографию [21].

Анализ специализированной научной литературы позволил определить, что снижение затрат на перевозки, без ущерба их объему и надежности, достигается сокращением числа структурных элементов в транспортном процессе и наращиванием у элементов функционала по взаимодублированию. В рамках действующей регулярной маршрутной сети такой эффект получается посредством резервирования, предполагающего формирование резервных каналов доставки пассажиров для компенсации потерь производительности базового вида городского транспорта, обуслов-

<sup>1</sup> Алушкин Ю.А. Моногорода в региональной экономике России: основные характеристики и новые условия развития / Ю.А. Алушкин // Евразийский международный научно-аналитический журнал «Экономические проблемы регионов и отраслевых комплексов». Проблемы современной экономики. № 3 (35). 2010. URL: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=3288>.

<sup>2</sup> Данные Всероссийской переписи населения за 2010 г. – URL: [https://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/perepis2010/croc/perepis\\_itogi1612.htm](https://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm).

ленной спадом пассажиропотока или загруженностью автодорог.

Однако, несмотря на серьезную проработку, проблему обеспечения надежности пассажирских перевозок нельзя считать в полной мере решенной. В настоящее время не исследовано влияние резервных каналов доставки на надежность и эффективность регулярных пассажирских перевозок. Помимо этого, имеющиеся методы не учитывают дополнительных затрат, связанных с формированием резервных каналов доставки пассажиров в рамках действующей регулярной маршрутной сети, а также с ликвидацией последствий от сбоев в их работе. В этой связи можно утверждать, что тема настоящего исследования является актуальной.

Целью исследования является разработка методического аппарата оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров, оценки и повышения их надежности в городах с градообразующими предприятиями, а также рекомендаций по практической его реализации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- разработка экономико-математической модели оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями;
- разработка математической модели оценки надежности регулярных перевозок пассажиров;
- обоснование практических рекомендаций по организации резервных маршрутов регулярных перевозок пассажиров с оценкой экономического эффекта на примере транспорта общего пользования г. Магнитогорска.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теоретической базы оптимизации регулярной маршрутной сети городского пассажирского транспорта.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования выполнены на основе анализа научной, нормативно-технической литературы и правовой базы, положений теории надежности технических и транспортных систем, системного анализа транспортных процессов. Анализ научной, нормативно-технической и правовой литературы позволил установить глубину проработки проблемы повышения эффективности и надежности регулярных перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями, а также сформулировать цель настоящего

исследования. Изучение основных положений теории надежности технических и транспортных систем, а также системный анализ транспортных процессов позволили обосновать влияние резервных регулярных автобусных маршрутов на надежность и эффективность перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями.

Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и дорожных условиях с использованием экономико-математического моделирования, методов теории вероятности и математической статистики, компьютерного моделирования, технико-экономического анализа, анализа пассажиропотоков, натуральных наблюдений.

Посредством перечисленных методов исследований авторами были получены математические модели резервирования регулярной маршрутной сети и оценки надежности перевозки пассажиров при использовании различных схем резервирования, а также оценена адекватность предложенных математических моделей. Кроме того, с помощью компьютерного моделирования установлена зависимость скорости транспортного потока от его интенсивности и зависимость технической скорости движения автобуса по дополнительным дорогам от интенсивности потока маршрутных транспортных средств.

Исходные данные для компьютерного моделирования были получены натурными наблюдениями за транспортными потоками по городским автодорогам, а также непосредственным подсчетом корреспонденций пассажиропотоков на регулярных маршрутах городского транспорта. Технико-экономический анализ позволил обосновать целесообразность практической реализации предлагаемого методического инструментария.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена обоснованностью принятых допущений при разработке математических моделей, совпадением результатов собственных теоретических и экспериментальных исследований с данными известных научных работ других авторов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно теории надежности, резервирование – это метод повышения надежности объектов посредством включения в их состав резервных элементов на этапе создания или эксплуатации. Резервирование регулярной маршрутной сети определяет эксплуатационные затраты и надежность перевозки пассажиров.

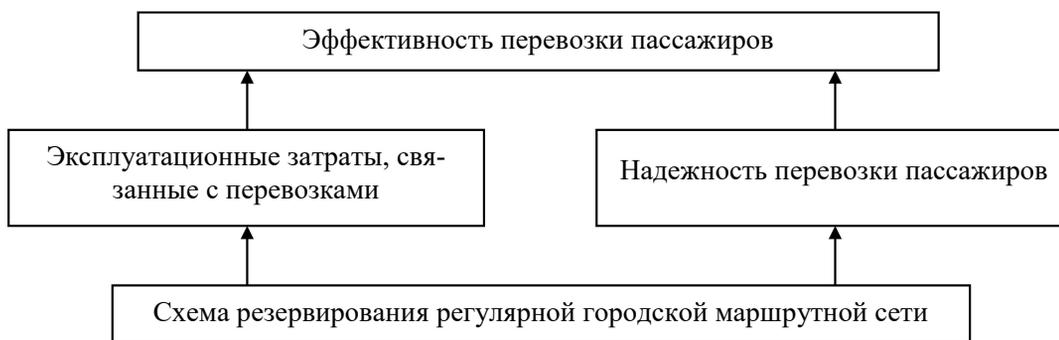


Рисунок 1 – Связь понятий схемы эффективности, эксплуатационных затрат, надежности перевозки пассажиров и схемы резервирования регулярной маршрутной сети

Figure 1 – Relations between the concepts of efficiency schemes, operating costs, reliability of passengers transportation and passengers transportation and redundancy schemes for a regular route network

Схема резервирования представляет собой совокупность основных и дублирующих (резервных) структурных элементов маршрутной сети и их соединений, называемых каналами доставки. Эксплуатационные затраты и надежность определяют эффективность перевозок: эксплуатационные затраты оказывают непосредственное влияние на эффективность, надежность – косвенное, через количество сбоев в транспортном процессе. Рассматриваемые понятия иерархически связаны (рисунок 1).

Ввод или исключение из действующей регулярной маршрутной сети городского транспорта резервных маршрутов позволяет управлять надежностью и эффективностью процесса перевозки пассажиров. В городах с градообразующими предприятиями резервные маршруты городского транспорта имеют следующие отличительные особенности:

- совпадение участков трассы и синхронизированность расписаний движения с основными (резервируемыми) маршрутами;
- организация посадки-высадки пассажиров в любом не запрещенном правилами дорожного движения месте;

- возможность управления скоростью сообщения за счет перенаправления потока маршрутных транспортных средств по дополнительным дорогам городской автодорожной сети в период ее загрузки (в случае автобусного транспорта).

Многовариантность компоновки городской маршрутной сети предполагает наличие оптимального сочетания основных и резервных маршрутов городского транспорта. Оптимизацию маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров предлагается производить посредством экономико-математического моделирования. Критерием оптимизации является минимум совокупных затрат на перевозку пассажиров ( $Z_{сов.}$ ), включающих затраты на формирование транспортной инфраструктуры для организации движения транспорта по резервным маршрутам ( $Z_{ф.}$ ), эксплуатационных затрат на перевозку ( $C$ ) и затрат на ликвидацию сбоев в работе городского транспорта ( $Z_{сб.}$ ). В случае организации автобусного движения по резервным маршрутам целевая функция математической модели примет вид

$$\begin{aligned}
 Z_{сов.} = Z_{ф.} + C + Z_{сб.} = & \frac{D_k}{365} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{U_{o.f.i}}{T_{пол.i}} + \\
 & + \frac{(P_{OTB} + P_{OTK} + P_{ECH} + P_T + P_{см.} + P_{a/ш} + P_{TOuP} + P_{ам.} + P_{np.}) \cdot \beta}{S} + \\
 & + \frac{Ш^{\Sigma} \cdot Ц \cdot Q_{Дк} \cdot D_k \cdot Q(t) \cdot (1 + 0,01 \cdot \gamma)^{\frac{D_k}{365}}}{100} \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $D_k$  – продолжительность рассматриваемого периода, дни;  $Ц_о.ф.i$  – суммарная стоимость инфраструктуры, необходимой для организации движения транспорта по резервным маршрутам, руб.;  $Тпол.i$  – срок полезного использования инфраструктуры  $i$ -й амортизационной группы, лет;  $k$  – число рассматриваемых амортизационных групп;  $POTB, POTK, PECH, PT, Pсм., Pa/ш., PTO-uP, Ram., Pпр.$  – расходы соответственно на оплату труда водителей и кондукторов, отчисления во внебюджетные фонды, затраты на топливо, смазочные и эксплуатационные материалы, износ автошин, техническое обслуживание и ремонт, амортизацию, прочие расходы в сумме с кос-венными расходами по парку транспортных средств, руб./км;  $\beta$  – средний коэффициент использования пробега автобусов на маршрутах;  $S$  – пробег автобусов на маршрутах за период, км;  $Ш\Sigma$  – суммарная величина штрафов или компенсаций за нарушения в транспортном процессе по вине перевозчика, % от платы за проезд;  $Ц$  – плата за проезд и провоз багажа, руб.;  $Q_{Дк}$  – объем перевозок по маршрутам за период, чел.;  $Q(t)$  – вероятность сбоа в процессе перевозок;  $\gamma$  – годовая процентная ставка на капитал, %.

Система ограничений предусматривает соблюдение показателей качества предоставляемых транспортных услуг для городского населения, таких как соблюдение перевозчиком установленного интервала движения и количества транспорта на резервных маршрутах, недопустимость удорожания проезда в текущем отчетном периоде. Система ограничений математической модели запишется в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{предл.} \leq I_3 \\ \frac{З_{сов.}}{Q_{Дк}} \leq \frac{Ц}{(1 + 0,01 \cdot R)} \\ A_m \geq \sum_{i=1}^h A_{mi}^h + \sum_{j=1}^{l-h} A_{mj}^{l-h} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $I_{предл.}, I_3$  – предлагаемый и заданный интервал движения, мин;  $R$  – рентабельность перевозок, %;  $A_m$  – необходимое для обслуживания заданного объема перевозок число транспортных средств, ед.;  $A_m$  – число транспортных средств на основных маршрутах, ед.;  $A_m^{l-h}$  – число транспортных средств на резервных маршрутах, ед.;  $h$  – количество основных маршрутов, шт.;  $(l-h)$  – количество резервных маршрутов, шт.;  $l$  – сумма основных и резервных маршрутов, шт.

Вероятность сбоа в процессе перевозок  $Q(t)$  определяется надежностью этого процесса. Для потребителя транспортных услуг сбоем в работе городского транспорта будет опоздание прибытия транспортного средства на остановочный пункт согласно расписанию, задержки в пути следования, невозможность осуществления посадки в транспортное средство по причине отсутствия свободных мест. При отсутствии резервных маршрутов вероятность таких сбоев больше, и наоборот, наличие в действующей регулярной маршрутной сети городского транспорта резервных маршрутов практически сводит к нулю возможные сбои. Надежность перевозки пассажиров при наличии резервных маршрутов в регулярной городской маршрутной сети предлагается производить посредством расчета надежности мажоритарных схем резервирования замещением на основе формулы полной вероятности совместных событий. При равной надежной работе транспортных средств математическая модель оценки надежности регулярных перевозок пассажиров примет вид

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \left[ (1 - (1 - P)^{A_m^h}) + \left( \sum_{j=1}^{l-h} P_j^{A_m^{l-h}} \cdot (1 - P_j^{A_m^{l-h}}) \right) \cdot (1 - P)^{A_m^h} \right], \quad (3)$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы транспортного средства на основных маршрутах;  $P_j$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го транспортного средства на резервных маршрутах.

Следует отметить, что безотказная работа транспортного средства означает не только то, что оно работает без поломок. Это понятие намного шире и включает, например, временное прекра-

щение в работе всех исправных трамваев на маршруте по причине выхода из строя одного трамвая и занятости им рельсовой колеи в ожидании прибытия ремонтной бригады.

Пассажиропоток, осваиваемый на резервных маршрутах, формируется исходя из наличия потребностей населения в трудовых перемещениях, которые не удовлетворяются основными маршрутами городского транспорта по причине больших интервалов движения либо отсутствия нужного маршрута.

Соответствие основных маршрутов городского транспорта потребностям населения в трудовых перемещениях можно оценить по формуле

$$\varphi = \frac{Q_i^{\text{комф.}}}{n}, \quad (4)$$

где  $Q^{\text{комф.}}$  – количество прошедших через проходные градообразующего предприятия человек, для которых время ожидания транспортного средства на остановочных пунктах регулярной маршрутной сети не превышает времени комфортного ожидания, чел./сут;  $n$  – суммарное количество транзакций входов и выходов через проходные за сутки.

Время комфортного ожидания пассажиром транспортного средства на остановочном пункте принято в расчетах 15 мин. При наличии оцифрованной информации о прохождении через контрольно-пропускные пункты предприятия его сотрудников расчет величины ( $\varphi$ ) легко автоматизируется. Величина ( $\varphi$ ), меньшая 1,0, свидетельствует о несоответствии регулярной маршрутной сети городского транспорта потребностям населения в трудовых перемещениях и наличия потенциально возможного пассажиропотока, который будет освоен резервными маршрутами.

При организации резервных регулярных автобусных маршрутов имеется возможность поддержания заданного интервала движения меньшим количеством автобусов, что благоприятно сказывается на эксплуатационных затратах, связанных с перевозкой пассажиров. Этот эффект достигается управлением скоростью сообщения за счет перенаправления потока маршрутных транспортных средств по дополнительным дорогам городской дорожной сети в период ее загрузки.

Направление автобусов на дополнительные дороги, дублирующие основные транспортные магистрали, позволяет заметно увеличить скорость сообщения. Данный по-

казатель зависит от планировочных решений городской дорожной сети, наличия на ней дополнительных дорог, дублирующих основные магистрали. Планировочные решения индивидуальны для каждого населенного пункта. На примере г. Магнитогорска авторами установлено, что скорость сообщения при реализации таких возможностей увеличивается в среднем на 4 км/ч.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Поставленные в работе задачи выполнены в полном объеме. По итогам исследования получены методические рекомендации по согласованию взаимодействия заказчика и поставщика автотранспортных услуг в производственном процессе. Научная новизна исследования состоит:

- в разработке оптимизационной экономико-математической модели маршрутной сети регулярных перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями;
- в разработке математической модели оценки надежности регулярных перевозок пассажиров.

Практическая значимость полученных результатов заключается в обосновании рекомендации по организации резервных маршрутов регулярных перевозок пассажиров на примере г. Магнитогорска.

Целесообразность практической реализации предлагаемых рекомендаций обоснована на примере формирования резервного канала доставки трудящихся Магнитогорского металлургического комбината (ММК) по регулярному автобусному маршруту № 33. Ритм работы подразделений ММК определяет маятниковый принцип формирования пассажиропотока: утром в восточном направлении, вечером – в западном. Местами генерации и погашения массовых пассажиропотоков являются проходные ММК, поэтому регулярные маршруты городского транспорта пролегают по транспортным артериям, огибающим границы промышленной площадки, что обуславливает совпадение протяженных участков трассы большей части регулярных маршрутов. Поэтому большая часть трассы маршрута совпадает с трассой трамвайного маршрута № 3, являющимся в расчетах основным (рисунок 2).

Расчет по формуле (4) позволил установить, что резервируемый маршрут № 3 соответствует потребностям трудящихся ММК на 17%. Наличие общего участка трассы дает возможность обслуживания этого пассажиропотока резервным регулярным автобусным

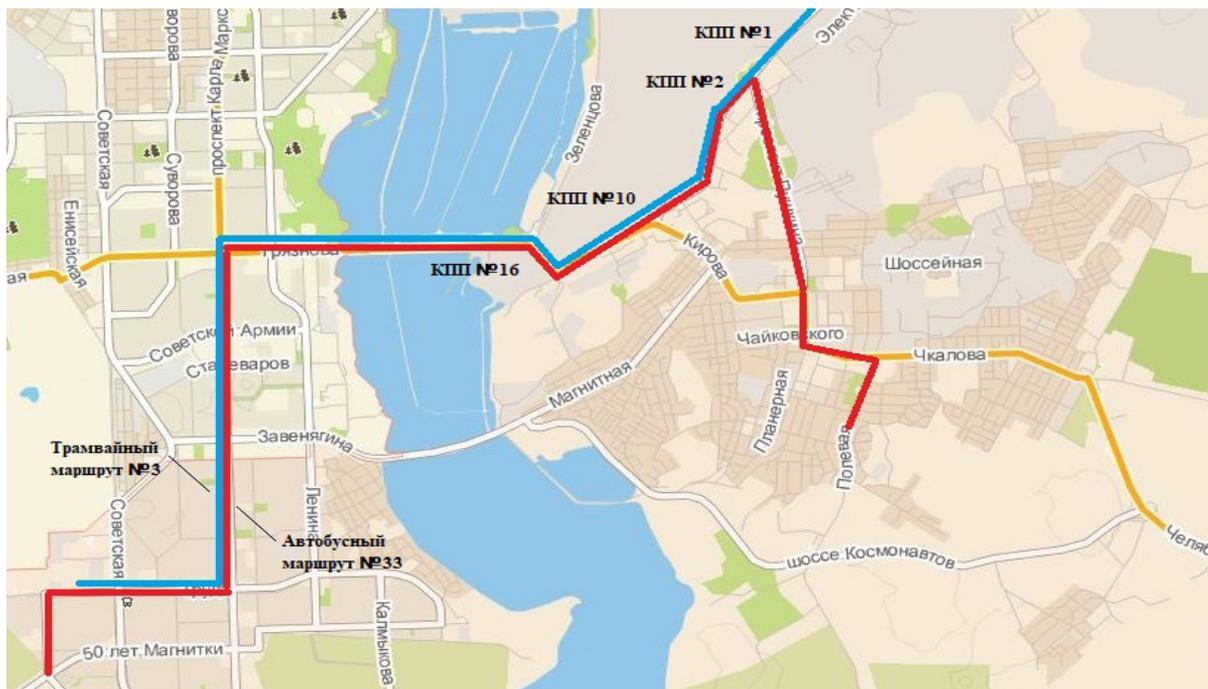


Рисунок 2 – Схема автобусного маршрута № 33 и трамвайного маршрута № 3 с остановочными пунктами, привязанными к проходным Магнитогорского металлургического комбината

Figure 2 – Scheme of the 33 bus route and the 3 tram route with stopping points to Magnitogorsk metallurgical plant

маршрутом № 33. Зная время прохода трудящихся через проходные, конечную остановку следования потенциального пассажира, с учетом затрат времени на его перемещение пешком от проходной или места жительства к ближайшим остановочным пунктам, производится детализация потенциального пассажиропотока на резервном маршруте по периодам суток. Интенсивность накопления потенциальных пассажиров на остановочных пунктах, ближайших к проходным ММК, позволяет задать интервал движения автобусов на резервном маршруте, а маршрутная скорость – рассчитать время оборота и необходимое число автобусов, что в свою очередь обеспечит составление информационного расписания.

Предложено в период с 15:00 по 18:00 по будням, соответствующий максимальной загрузке пр. Карла Маркса, по которому пролегал трасса предлагаемого резервного маршрута, на участке от ул. Сталеваров до ул. Труда перераспределять маршрутные транспортные средства на дополнительную дорогу, параллельную пр. Карла Маркса. Расчетами установлено, что такая мера обеспечит увеличение скорости сообщения до 18 км/ч, что позволит соблюдать заданный интервал движения меньшим количеством автобусов в период загрузки дорожной сети и исключить необходимость увеличения их числа на линии.

Результаты расчета экономического эффекта по вариантам перевозок приведены в таблице.

Таблица  
Расчет экономического эффекта по вариантам перевозок

Table  
Calculation of the economic effect on transport options

Показатель, ед. измерения	Варианты перевозок		
	Существующий	Предлагаемые	
		Наращивание численности подвижного состава на маршруте № 3 без использования дублирующего канала доставки	Формирование дублирующего канала доставки на основе автобусного маршрута № 33
1. Протяженность общего участка маршрутов № 3 и 33, км	30		
2. Численность парка подвижного состава, ед.: – маршрут № 3 – маршрут № 33	7 8	8 8	7 6
3. Марка и модель подвижного состава: – маршрут № 3 – маршрут № 33	КТМ-5М3 ГАЗ-32212	КТМ-5М3 ГАЗель NEXT	
4. Годовой объем перевозок, чел./год: – маршрут № 3 – маршрут № 33	1 087 674 469 111	1 265 686 469 111	1 087 674 647 123
5. Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб./год	39 878,3	43 950	38559,6
6. Себестоимость перевозок, руб./чел.	25,61	25,33	22,23
7. Затраты на формирование транспортной инфраструктуры, тыс. руб.		0	2553,1
8. Затраты на ликвидацию сбоев в транспортном процессе, тыс. руб.	7,9	7,2	9,0
9. Совокупные затраты на маршруте, руб./чел.	25,61	25,34	23,71
10. Годовой экономический эффект, тыс. руб.	0	371,4	3206,9
11. Эффективность перевозок, чел./руб.	0,039	0,0395	0,042
12. Надежность перевозок пассажиров, %	0,83	0,81	0,95

На основе проведенных расчетов установлено, что формирование резервного канала доставки на основе регулярного автобусного маршрута № 33 обеспечит дополнительный объем перевозок, равный 178 тыс. пассажиров в год, за счет подачи автобусов на остановочные пункты маршрута в периоды отсутствия транспортных средств на основном маршруте. Направление автобусов резервного маршрута по дополнительной дороге в периоды загрузки автодорожной сети позволит увеличить их маршрутную скорость на 7 км/ч. Использование предлагаемых результатов обеспечит снижение себестоимости перевозки одного пассажира на 7%, повышение ее надежности в 1,14 раза и обслуживания дополнительного пассажиропотока без увеличения затрат на городской транспорт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по результатам проведенных исследований состоят в следующем:

1. Предложена математическая модель резервирования регулярной маршрутной сети, целевой функцией которой является минимум суммы затрат на формирование транспортной инфраструктуры для организации движения автобусов по резервным маршрутам, эксплуатационных затрат на перевозку и затрат на ликвидацию сбоев в работе городского транспорта. Система ограничений предусматривает соблюдение перевозчиком установленного интервала движения и количества транспорта на резервных маршрутах, недопустимость удорожания проезда в текущем отчетном периоде.

2. Предложена математическая модель оценки надежности перевозок пассажиров по

регулярным автобусным маршрутам в городах с градообразующими предприятиями с учетом схемы резервирования регулярной маршрутной сети, основанная на расчете надежности мажоритарных схем резервирования с замещением использования формулы полной вероятности совместных событий. Под сбоем в работе городского транспорта понимается опоздание прибытия транспортного средства на остановочный пункт согласно расписанию, задержки в пути следования, невозможность осуществления посадки в транспортное средство по причине отсутствия свободных мест.

3. Величина пассажиропотока на резервных регулярных маршрутах определяется по результатам анализа соответствия существующей маршрутной сети городского транспорта потребностям населения в трудовых перемещениях. Пассажиропоток, не осваиваемый основными регулярными маршрутами, после его детализации по периодам суток потенциально может быть освоен на резервных маршрутах.

4. Снижение затрат на обслуживание пассажиропотока на резервных автобусных маршрутах производится за счет поддержания заданного интервала движения меньшим количеством автобусов. Это достигается повышением маршрутной скорости движения в результате направления автобусов на дополнительные дороги в период ее загрузки.

5. Результаты расчета экономического эффекта от реализации предлагаемых рекомендаций на примере г. Магнитогорска позволяют утверждать о научной состоятельности и практической целесообразности результатов проведенного исследования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Другова Г.А., Тихонова М.В. Градообразующие предприятия в России: сущность, становление, перспектива // Вопросы экономики и права. Выпуск № 3. 2017. С. 98–102. <http://law-journal.ru/articles/index/201703>.
2. Сафронов К.Э., Сафронов Э.А. Повышение эффективности муниципальных и региональных маршрутных сетей // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 5. С. 162–170.
3. Grishaeva Y.M., Matantseva O.Y., Spirin I.V., Savosina M.I., Tkacheva Z.N., Nasin D.V. Sustainable development of transportation in the cities of Russia: experience and priorities. South of Russia: ecology, development, vol. 13, no. 4, 2018, pp. 24-46. ISSN 2413-0958 DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-4-24-46>.
4. Ефименко Д.Б., Финько Е.В. Использование навигационных диспетчерских систем для развития специализированных сервисов информирования о работе наземного городского пассажирского транспорта // Автотранспортное предприятие. 2015. № 5. С. 6–10. <http://www.atp.transnavi.ru/?number=1505>.
5. Kurganov V., Gryaznov M., Dorofeev A. An ontology-driven approach for modelling TMS fuel consumption information subsystem. The 3<sup>rd</sup> International Conference on Information Processing and Control Engineering (ICIPCE 2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 630, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/630/1/012025>.
6. Lu J., Cao L. Congestion evaluation from traffic flow information based on fuzzy logic. In Proceedings: IEEE Intelligent Transportation Systems, Vol. 1, 2003, pp. 50-53. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2003.1251919>. [https://www.researchgate.net/publication/4048004\\_Congestion\\_evaluation\\_from\\_traffic\\_flow\\_information\\_based\\_on\\_fuzzy\\_logic](https://www.researchgate.net/publication/4048004_Congestion_evaluation_from_traffic_flow_information_based_on_fuzzy_logic).
7. Schneider W. Mobile phones as a basis for traffic state information. In Proceedings IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005, pp. 782-784. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2005.1520148>. <https://www.semanticscholar.org/paper/Mobile-phones-as-a-basis-for-traffic-state-Schneider/5f176aa378dd1924953494151aafa1a444396e11>. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2005.1520148>.
8. Гудков В.А., Хьюнг Н., Дулина Н.В., Мыльников П.А. Оценка пассажирами городского общественного транспорта // Мир транспорта. 2013. № 2. С. 146–150. <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/353>.
9. Hebel K., Wolek M. Perception of modes of public transport compared to travel behaviour of urban inhabitants in light of market research. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transpor, no. 92, 2016, pp. 65-75. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2016.92.7>.
10. Batley R., Bates J., Bliemer J., Borjesson M., Worsley T. New appraisal values of travel time saving and reliability in Great Britain. Transportation, vol. 46, 2019, pp. 583 – 621. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9798-7>.
11. Арсланов М.А., Минатуллаев Ш.М., Филиппов А.А. Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотока // Вестник СибАДИ. 2018. № 15(3). С. 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>.
12. Исаков К., Стасенко Л.Н., Алтыбаев А.Ш., Даиырбекова Д. Влияние параметров цикла светофорного регулирования на пропускную способность регулируемых пересечений // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(2). С. 146–155. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-146-155>.
13. Мочалин С.М., Колебер Ю.А. Перспективы развития методов оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2019. № 6(3). С. 241–255. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-241-255>.
14. Эйхлер Л.В. Использование операционного анализа при управлении финансовыми результатами автотранспортной организации // Вестник СибАДИ. 2018. № 15(1). С. 149–157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-149-157>.

15. Лерман Е.Б. Организационно-экономические аспекты развития предприятий пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2015. № 5(45). С. 171–177. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5\(45\)-171-177](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5(45)-171-177).

16. Bokor Zoltan, Rita Markovits-Somogyi. Improved cost management at small and medium sized road transport companies: case Hungary. *Promet - Traffic & Transportation*, no. 27(5), 2015, pp. 417–428. [https://www.researchgate.net/publication/286479239\\_Improved\\_Cost\\_Management\\_at\\_Small\\_and\\_Medium\\_Sized\\_Road\\_Transport\\_Companies\\_Case\\_Hungary](https://www.researchgate.net/publication/286479239_Improved_Cost_Management_at_Small_and_Medium_Sized_Road_Transport_Companies_Case_Hungary). DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v27i5.1719>.

17. Шаров М.И., Михайлов А.Ю. Оценка надежности функционирования городского общественного транспорта в городах Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(3). С. 302–311. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-302-311>.

18. Lukinskiy V., Lukinskiy V., Churilov R. Problems of the supply chain reliability evaluation. *Transport and Telecommunication*, no. 15(2), 2014, pp. 120–129. DOI: <https://www.doi.org/10.2478/tjt-2014-0011>.

19. Taghizadeh H., Hagezi E. The investigation of supply chain's reliability measure: A case study. *Journal of Industrial Engineering International*, 2012, pp. 8–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-22>.

20. Vojtov V., Berezchnaja N., Kravcov A., Volkova T. Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering & Technology*, no. 7(4.3), 2018, pp. 270–274. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802>.

21. Курганов В.М., Грязнов М.В. Управление надежностью транспортных систем и процессов автомобильных перевозок: монография. Магнитогорск: Изд-во «Магнитогорский Дом печати», 2013. 318 с.

## REFERENCES

1. Drugova G.A., Tikhonova M.V. Gradoobrazuyushchie predpriyatiya v Rossii: sushchnost', stanovlenie, perspektiva [City-forming enterprises in Russia: essence, formation, perspective]. *Voprosy ekonomiki i prava*. 2017; 3: pp. 98–102 (in Russian).

2. Safronov K.E., Safronov E.A. Povyshenie effektivnosti municipal'nyh i regional'nyh marshrutnyh setej [Improving the efficiency of municipal and regional route networks]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; 5: 162–170 (in Russian).

3. Grishaeva Y.M., Matantseva O.Y., Spirin I.V., Savosina M.I., Tkacheva Z.N., Nasin D.V. Sustainable development of transportation in the cities of Russia: experience and priorities. *South of Russia: ecology, development*. 2018; 13 no. 4: 24–46. ISSN 2413-0958. DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-4-24-46>.

4. Efimenko D.B., Finko E.V. Ispol'zovanie navigacionnyh dispetcherskih sistem dlya razvitiya specializirovannyh servisov informirovaniya o rabote nazemnogo gorodskogo passazhirskogo transporta [Use of navigation dispatch systems for the development of specialized services for informing about the operation of ground urban passenger transport]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2015; 5: 6–10 (in Russian).

5. Kurganov V., Gryaznov M., Dorofeev A. An ontology-driven approach for modelling TMS fuel consumption information subsystem. The 3rd International Conference on Information Processing and Control Engineering (ICIPCE 2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 630. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/630/1/012025>.

6. Lu J., Cao L. Congestion evaluation from traffic flow information based on fuzzy logic. In *Proceedings: IEEE Intelligent Transportation Systems*. 2003; Vol. 1: 50–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2003.1251919>.

7. Schneider W. Mobile phones as a basis for traffic state information. In *Proceedings IEEE Intelligent Transportation Systems*. 2005: 782–784. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2005.1520148>.

8. Gudkov V.A., Huong N., Dulina N.V., Mylnikov P.A. Ocenka passazhirami gorodskogo obshchestvennogo transporta [Assessment by passengers of urban public transport]. *Mir transporta*. 2013; 2: 146–150 (in Russian).

9. Hebel K., Wolek M. Perception of modes of public transport compared to travel behaviour of urban inhabitants in light of market research. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016; 92: 65–75. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2016.92.7>.

10. Batley R., Bates J., Bliemer J., Borjesson M., Worsley T. New appraisal values of travel time saving and reliability in Great Britain. *Transportation*. 2019; 46: 583–621. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9798-7>.

11. Arslanov M.A., Minatullaev Sh.M., Filippov A.A. *Matematicheskaya model' organizacii perevozok passazhirov v ostanovochno-peresadochnykh punktah pri mnogokratnom izmenenii passazhiropotoka* [Mathematical model of passenger transportation at stopping points with multiple changes in passenger flow]. *Vestnik SibADI*. 2018; 15(3): 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371> (in Russian).

12. Isakov K., Stasenko L.N., Altybaev A.Sh., Dayyrbekova D. *Vliyaniye parametrov cikla svetofornogo regulirovaniya na propusknyuyu sposobnost' reguliruemykh peresechenij* [Effect of traffic light cycle parameters on the throughput of regulated intersections]. *Vestnik SibADI*. 2019; no. 16(2): 146–155. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-146-155> (in Russian).

13. Mochalin S.M., Koleber Yu.A. Perspektivy razvitiya metodov optimizacii marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Prospects for the development of methods for optimizing route networks of urban passenger transport]. *Vestnik SibADI*. 2019; 6(3): 241–255. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-241-255> (in Russian).

14. Eichler L. B. Ispol'zovanie operacionnogo analiza pri upravlenii finansovymi rezul'tatami avtotransportnoj organizacii [Use of operational analysis in the management of financial results of a motor transportation organization]. *Vestnik SibADI*. 2018; 15(1): 149–157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-149-157> (in Russian).

15. Lerman E.B. Organizacionno-ekonomicheskie aspekty razvitiya predpriyatij passazhirskogo transporta

[Organizational and economic aspects of the development of passenger transport enterprises]. *Vestnik SibADI*. 2015; 5(45): 171–177. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5\(45\)-171-177](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5(45)-171-177) (in Russian).

16. Bokor Zoltan, Rita Markovits-Somogyi. Improved cost management at small and medium sized road transport companies: case Hungary. *Promet - Traffic & Transportation*. 2015; 27(5): 417–428. DOI: <https://doi.org/10.7307/ppt.v27i5.1719>.

17. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu. Ocenka nadezhnosti funkcionirovaniya gorodskogo obshchestvennogo transporta v gorodah Rossijskoj Federacii [Assessment of the reliability of urban public transport in the cities of the Russian Federation]. *Vestnik SibADI*. 2019; 16(3): 302–311. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-302-311> (in Russian).

18. Lukinskiy V., Lukinskiy V., Churilov R. Problems of the supply chain reliability evaluation. *Transport and Telecommunication*. 2014; 15(2): 120–129. DOI: <https://www.doi.org/10.2478/tj-2014-0011>.

19. Taghizadeh H., Hagezi E. The investigation of supply chain's reliability measure: A case study. *Journal of Industrial Engineering International*. 2012: 8–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-22>.

20. Vojtov V., Berezchnaja N., Kravcov A., Volkova T. Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(4.3): 270–274. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802>.

21. Kurganov V.M., Gryaznov M.V. *Upravlenie nadezhnost'yu transportnyh sistem i processov avtomobil'nyh perevozok* [Reliability management of transportation systems and road transport processes]. Monografiya: Magnitogorsk: Izd-vo «Magnitogorskij Dom pečati», 2013: 318 (in Russian).

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Курганов Валерий Максимович* – научная редакция статьи и отчетных материалов, определение теоретических положений обеспечения надежности транспортных процессов и транспортных систем, методическая поддержка в вопросах обеспечения эффективности и надежности функционирования городского пассажирского транспорта, контроль корректности используемой терминологии и полученных результатов.

*Грязнов Михаил Владимирович* – научное руководство исследованием, включая формулировку проблемы, ее актуальность, идеи работы, постановку задач, формирование общей схемы проведения исследования, формулировка организационно-технологической специфики регулярной маршрутной сети городского транспорта в городах с градообразующими предприятиями, методическая поддержка в разработке экономико-математической модели оптимизации маршрутной сети.

*Давыдов Кирилл Александрович* – анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемой проблеме, разработка оптимизационной экономико-математической модели, математической модели оценки надежности регулярных перевозок пассажиров, формирование массива исходной информации, проведение расчетов.

## AUTHORS' CONTRIBUTION

*Valery M. Kurganov* – scientific edition of the article and reporting materials; determination of the theoretical provisions for ensuring the reliability of transport processes and transport systems; methodological support in ensuring the efficiency and reliability of urban passenger transport; verifying the correctness of the terminology and results.

*Mikhail V. Gryaznov* – scientific management of the study, including the formulation of the problem, its relevance, ideas for work, setting objectives, forming a general scheme for conducting the study, formulating the organizational and technological specifics of the regular route network of urban transport in cities with city-forming enterprises, methodological support in the development of economic and mathematical route network optimization models.

*Kirill A. Davydov* – analysis of scientific and regulatory literature; development of an optimization economic and mathematical model; a mathematical model for assessing the reliability of regular passenger transportation; the formation of an array of source information; calculations.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Курганов Валерий Максимович* – д-р техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», проф. кафедры математики, статистики и информатики в экономике, ORCID 0000-0001-8494-2852 (170100, Россия, г. Тверь, ул. Желябова, д. 33, [glavreds@gmail.com](mailto:glavreds@gmail.com)).

*Грязнов Михаил Владимирович* – д-р техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доц. кафедры логистики и управления транспортными системами (455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38, [gm-autolab@mail.ru](mailto:gm-autolab@mail.ru)). ORCID 0000-0003-3142-1089.

*Давыдов Кирилл Александрович* – менеджер Магнитогорского филиала ООО «Автодоркомплект» (455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, ул. Герцена, д. 6, блок С, офис 406С, [davyd\\_mazda@mail.ru](mailto:davyd_mazda@mail.ru)). ORCID 0000-0002-6165-3377.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Valery M. Kurganov* – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Tver State University, Professor of the Department of Mathematics, Statistics and Informatics in Economics, ORCID 0000-0001-8494-2852 (170100, Russia, Tver, 33, Zhelyabova St., e-mail: [glavreds@gmail.com](mailto:glavreds@gmail.com)).

*Mikhail V. Gryaznov* – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Associate Professor of the Department of Logistics and Management of Transport Systems (455000, Russia, Chelyabinsk region, Magnitogorsk, 38, Lenin Ave., e-mail: [gm-autolab@mail.ru](mailto:gm-autolab@mail.ru)). ORCID 0000-0003-3142-1089.

*Kirill A. Davydov* – manager of the Magnitogorsk branch of “Avtodorkomplekt” (455000, Chelyabinsk region, Magnitogorsk, 6, Gertsen St., block C, office 406C, e-mail: [davyd\\_mazda@mail.ru](mailto:davyd_mazda@mail.ru)). ORCID 0000-0002-6165-3377.

УДК 621.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ ВОЗДУХОМ

**Р.В. Якимушкин**

Филиал военной академия материально-технического обеспечения имени генерала армии  
А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации,  
г. Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расчет эффективных показателей вихревого эжектора, применяемого в системе питания дизеля воздухом, является актуальной задачей, поскольку позволяет существенно уменьшить время на определение рациональных конструктивных параметров на стадии проектирования. Перспективным направлением, позволяющим с высокой физической адекватностью, «из первых принципов», моделировать аэродинамические процессы в вихревых аппаратах, является один из модификаций метода динамики частиц. Цель исследования – моделирование газодинамики в проточной части вихревого эжектора.

**Материалы и методы.** В статье рассматривается способ имитационного математического моделирования эжектирующего и эжектируемого потоков в вихревом эжекторе. Предложенная модификация метода динамики частиц позволяет с помощью простых законов классической динамики описывать аэродинамические процессы, а при помощи программных средств системы Delphi 7 моделировать их. Приводятся дифференциальные уравнения, которые решаются методом Рунге-Кутты второго порядка. В результате решения определяются траектории движения элементов воздуха в вихревом эжекторе, позволяющие оценить эффективные показатели вихревых аппаратов.

**Результаты.** Для исследования модели разработана программа с возможностью в окне интерфейса задавать геометрические параметры вихревого эжектора, выводить на экран текущие значения параметров процесса.

**Обсуждение и заключение.** Предложенная математическая модель и реализующая ее компьютерная программа позволяют количественно оценить эффективность вихревых аппаратов на этапе их проектирования. Преимущество предлагаемой математической модели заключается в более точном расчете параметров вихревого потока от конструкции вихревого эжектора и физических свойств эжектирующего и эжектируемого потоков.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вихревой эжектор, наддув, охладитель наддувочного воздуха, метод динамики частиц, дизель, геометрические параметры.

Поступила 09.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Автор выражает благодарность за нелегкий труд рецензентам, которые работали с настоящей статьей.

Для цитирования: Якимушкин Р.В. Математическая модель аэродинамических процессов в вихревых аппаратах системы питания дизеля воздухом. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1): 110-120. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

© Якимушкин Р.В.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

## VORTEX DEVICES OF THE DIESEL AIR SUPPLY SYSTEM: MATHEMATICAL MODEL OF AERODYNAMIC PROCESSES

**Roman V. Yakimushkin**

Army General A.V. Khrulev Military Academy of Logistics,  
Omsk, Russia

**Introduction.** The calculation of effective indicators of the vortex ejector used in the diesel air supply system is a pressing task as it allows significantly reducing time for determination of rational design parameters at the design stage. One of the modifications of the particle dynamics method is a promising direction, allowing with high physical adequacy, “from the first principles,” to model aerodynamic processes in vortex devices. Therefore, the purpose of the paper is to develop a mathematical model of a vortex ejector.

**Materials and methods.** The paper discussed a method of the mathematical simulation of ejection and ejection flows in a vortex ejector. The proposed modification of the particle dynamics method allowed describing aerodynamic processes with the help of simple laws of classical dynamics, and modeling them with the help of software of the Delphi 7 System. The author presented differential equations, which were solved by the Runge-Kutt method of the second order. As a result of the solution, the authors determined paths of air elements movement in the vortex ejector, which allowed estimating effective parameters of vortex devices.

**Results.** To study the model, the author developed a program with the possibility to set geometric parameters of the vortex ejector in the interface window and to display the current values of the process parameters.

**Discussion and conclusions.** Proposed mathematical model and computer program make it possible to quantify efficiency of vortex devices at their design stage. The advantage of the proposed mathematical model lies in more accurate calculation of vortex flow parameters from the vortex ejector design and physical properties of ejecting and ejecting flows.

**KEYWORDS:** vortex ejector, turbocharged, charge air cooler, particle dynamics, diesel, geometric parameters.

**Submitted 09.01.2020, revised 21.02.2020.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The author expresses his gratitude to the reviewers of the manuscript.

*For citation:* Yakimushkin R.V. Vortex devices of the diesel air supply system: mathematical model of aerodynamic processes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):110-120. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

© Yakimushkin R. V.



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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уровень развития технологий таков, что сегодня турбонаддувом оснащаются практически все дизели [1, 2]. В современных комбинированных дизелях плотность воздуха при использовании наддува увеличивают до трех раз, а в некоторых случаях и больше, что существенно повышает мощность и топливную экономичность [1]. Однако с повышением плотности воздуха значительно растет и его температура, что сказывается на тепловой напряженности дизеля [3, 4]. Возможность снижения тепловой напряженности цилиндропоршневой группы (ЦПГ), повышения плотности свежего заряда воздуха, поступающего в цилиндр дизеля за счет совершенствования и применения теплообменного оборудования на образцах бронетанкового вооружения (БТВ), существенно ограничены в виду дефицита свободного объема в моторно-трансмиссионном отделении (МТО) [5].

Широкое применение на БТВ охладителей наддувочного воздуха по типу «воздух-воздух» или «воздух-жидкость» традиционных схем, которые были предложены еще Рудольфом Дизелем, не являются достаточно эффективными [6]. На образцах БТВ, оснащенных комбинированным дизелем с охладителем наддувочного воздуха (ОНВ) для создания потока охлаждающего воздуха, классически нашли применение центробежные вентиляторы. Вентилятор, как правило, имеет механическую связь с силовой установкой (СУ) и приводится во вращение от коленчатого вала двигателя [7]. Использование данных схем требует значительной мощности, что приводит к снижению энергетических характеристик дизелей, применяемых на объектах БТВ. Требования к образцам БТВ, изложенные в руководящих документах, направлены на повышение энергетических характеристик дизеля, реализовать которые возможно путем эффективного использования энергии отработавших газов<sup>1</sup> [7, 8]. Для создания воздушного потока, испол-

няя роль вентилятора, удаления пыли из пылесборников воздухоочистителей, вентиляции МТО, нашли широкое применение устройства, работающие на отработавших газах – газоструйные насосы (эжекторы)<sup>2</sup>.

Применение в конструкции таких эжекторов при всех своих положительных качествах имеют существенные недостатки, основной из которых – низкий коэффициент эжекции<sup>3</sup> [9].

Известные способы создания воздушного потока через теплообменник ОНВ в бронированном пространстве БТВ не в полной мере позволяют обеспечить поддержание температуры воздуха, поступающего в цилиндр дизеля в области рациональных значений [6, 8]. Это указывает на существование потребности в разработке нетрадиционной аппаратуры, позволяющей реализовать необходимые для качественного протекания рабочего цикла комбинированного дизеля значения температуры наддувочного воздуха. Альтернативой струйных аппаратов (эжекторов) могут стать более эффективные вихревые эжекторы, такие устройства достаточно просты конструктивно, надежны и не требуют значительных материальных затрат на обслуживание<sup>4</sup> [9].

Вихревой эжектор (ВЭ) позволяет организовать поток охлаждающего воздуха через ОНВ дизеля, используя энергию выхлопных газов. К настоящему времени предложен ряд конструкций ВЭ, которые обладают необходимыми параметрами для применения в обслуживающих системах дизеля [10, 11]. Несмотря на то, что в литературе можно найти экспериментальные и качественные теоретические оценки, отсутствуют комплексные теоретические подходы, позволяющие с высокой физической адекватностью, «из первых принципов», моделировать работу ВЭ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В последнее время для описания сложных аэродинамических процессов часто используют различные модификации метода динамики

<sup>1</sup> Усов О.А., Корольков Р.Н., Лойко А.В. Математическая модель дизельного двигателя для расчета режимов работы моторно-трансмиссионных установок военной гусеничной машины // 35-я Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий, посвященная 70-летию Победы (Миасс, 16–18 июня 2015 г.): труды. Миасс, 2015. С. 114–121.

<sup>2</sup> Подвидз Л.Г., Кирилловский Ю.Л. Расчет струйных насосов и установок // Труды ВНИИ Гидромаш. 1968. Вып. 38. С. 44–96.

<sup>3</sup> Умяров Х. Великий шелковый путь: вихри в колодцах // Техника молодежи. 2008. № 8. С. 20–24.

<sup>4</sup> Умяров Х. Великий шелковый путь: вихри в колодцах // Техника молодежи. Там же.

частиц<sup>5</sup> [12, 13, 14, 15]. В рамках данного метода воздушная среда дискретизируется на отдельные однотипные элементы в форме шара (рисунок 1). В элементы необходимо перенести физические свойства воздуха, в частности плотность, давление, температуру, которые связаны уравнением состояния идеального газа. В отличие от более грубого приближения сплошной среды в методе динамики частиц элементы могут двигаться в пространстве как

отдельные физические тела, подчиняясь законам классической динамики. В модели учитывается взаимодействие элементов как между собой, так и с рабочими поверхностями вихревого эжектора (рисунок 2). Дискретизация газовой среды на отдельные элементы позволяет воспроизводить такие сложные явления, как вихри, турбулентные процессы, смешивание разнотипных газов, кавитацию.

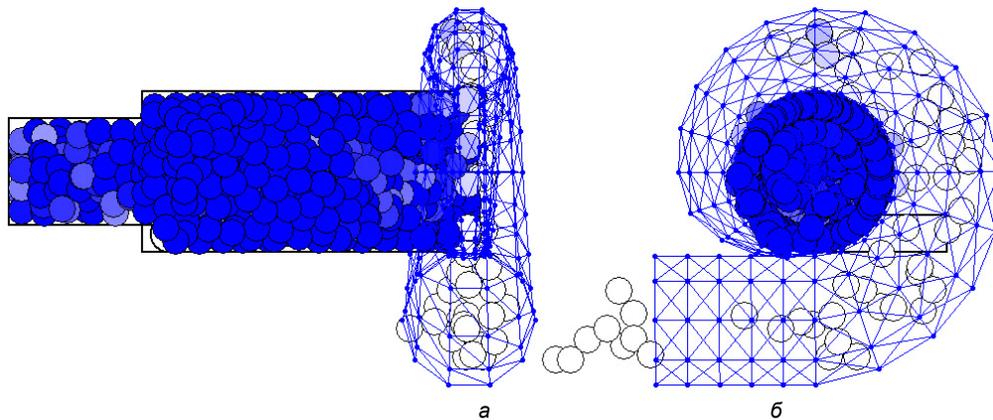


Рисунок 1 – Представление вихревого эжектора в модели: проекции XZ (а) и YZ (б)

Figure 1 – Representation of the vortex ejector in the model: projections XZ (a) and YZ (b)

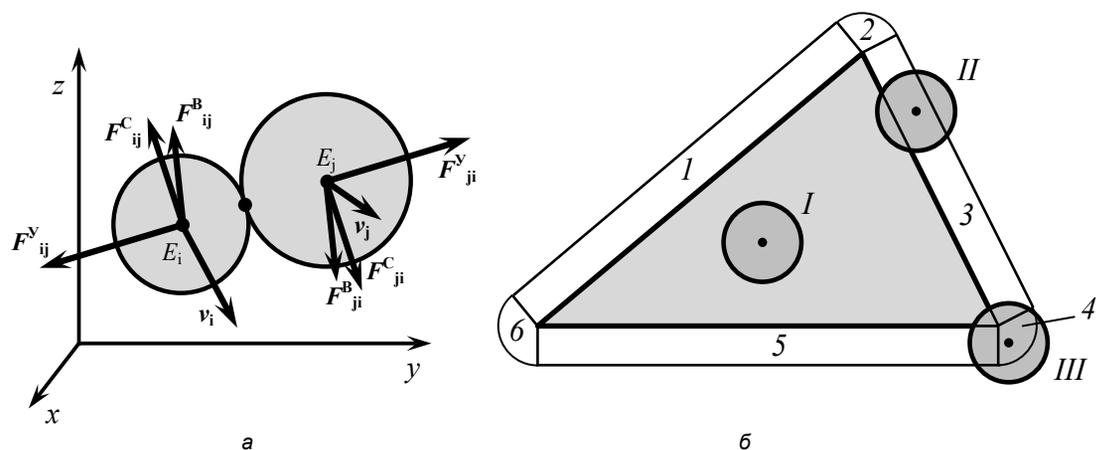


Рисунок 2 – Силы взаимодействия, возникающие при контакте двух элементов газа (а) и между элементом газа и элементом рабочей поверхности эжектора (б):  $F^Y$  – упругие силы;  $F^C$  – силы сухого трения;  $F^B$  – силы вязкого трения. Жирным шрифтом обозначены векторные величины

Figure 2 – Forces of interaction arising at contact of two elements of gas (a) and between element of gas and element of working surface of ejector (b):  $F^Y$  – elastic forces;  $F^C$  – dry friction forces;  $F^B$  – viscous friction forces. Vector values are indicated in bold

<sup>5</sup> Кравцевич Л.И., Прибыток П.В., Савицкий В.В. Программные средства для моделирования процессов в жидкостях методом молекулярной динамики // Сборник работ 64-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ. Минск, 2007. С. 45–48.

В модели приняты следующие допущения:

- элементы воздуха (либо выхлопных газов) движутся по законам классической динамики, взаимодействуя между собой и с рабочими поверхностями вихревого эжектора;
- элемент воздуха (либо выхлопных газов) является однородным в пространстве. В пределах всего элемента постоянна объемная плотность, температура, давление;
- передача тепла между элементами описывается классическим уравнением теплопроводности;
- механические свойства элементов воздуха (либо выхлопных газов) зависят только от четырех параметров: диаметра, массы, коэффициентов жесткости и вязкости;
- механическое взаимодействие описывается в линейном упруго-вязком приближении.

Каждый элемент газа  $i$  задается в модели девятью переменными: декартовыми координатами его центра  $x_i, y_i, z_i$ ; компонентами его скорости  $v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$ , а также параметрами состояния газа: удельным объемом  $V_i$ , давлением  $P_i$ , температурой  $T_i$ .

Механическое движение каждого элемента описывается на основе второго закона Ньютона:

$$\left. \begin{aligned}
 & i = 1 \dots N_3; \\
 & m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{ij} \left( \frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{xj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{xj}) \right) c_{ij} \left( r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\
 & 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2};
 \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{i-\Pi j} \left( \frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{x\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{x\Pi j}) \right) c_{ij} \left( r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\
 & 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2};
 \end{aligned} \right\}; \\
 & m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{ij} \left( \frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{yj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{yj}) \right) c_{ij} \left( r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\
 & 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2};
 \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{i-\Pi j} \left( \frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{y\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{y\Pi j}) \right) c_{ij} \left( r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\
 & 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2};
 \end{aligned} \right\}; \\
 & m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{ij} \left( \frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{zj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{zj}) \right) c_{ij} \left( r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\
 & 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2};
 \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned}
 & c_{i-\Pi j} \left( \frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left( k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{z\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right) c_{ij} \left( r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\
 & 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2};
 \end{aligned} \right\} - m_i g,
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $i$  – номер элемента;  $N_3$  – количество элементов;  $m_i$  – масса элемента;  $t$  – время;  $j$  – номер элемента, находящегося в контакте с  $i$ -м элементом;  $c_{ij}$  – коэффициент жесткости взаимодействия элементов  $i$  и  $j$ , рассчитываемый через объемный модуль упругости газа;  $k_{ij}^C$  и  $k_{ij}^B$  – коэффициенты сухого и вязкого трения элементов  $i$  и  $j$  друг о друга;  $d_i$  – диаметр  $i$ -го элемента;  $r_{ij}$  – расстояние между центрами элементов  $i$  и  $j$ ;  $\alpha_0$  – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами;  $N_{\Pi}$  – количество элементарных поверхностей вихревого эжектора;  $c_{i-\Pi j}$ ,  $k_{ij}^C -_{\Pi j}$  и  $k_{ij}^B -_{\Pi j}$  – коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента  $i$  с поверхностью  $j$ ;  $r_{i-\Pi j}$  – расстояние от центра  $i$ -го элемента до  $j$ -й поверхности;  $x_{i-\Pi j}$ ,  $y_{i-\Pi j}$ ,  $z_{i-\Pi j}$  – декартовы коор-

динаты точки проекции центра элемента  $i$  на поверхность  $j$ ;  $V_{x\Pi j}$ ,  $V_{y\Pi j}$ ,  $V_{z\Pi j}$  – компоненты скорости центра  $j$ -й элементарной поверхности;  $|\dots|$  – модуль вектора;  $g$  – ускорение свободного падения. Межэлементное расстояние  $r_{ij}$  определяется по теореме Пифагора

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Дифференциальные уравнения (1) содержат независимые переменные и решаются методом Рунге-Кутты второго порядка<sup>6</sup>. В результате решения системы дифференциальных уравнений второго порядка получаются функции  $x_i(t)$ ,  $y_i(t)$ ,  $z_i(t)$ , определяющие траектории движения элементов воздуха в вихревом эжекторе и позволяющие оценить коэффициент эжекции.

Для задания элементарных поверхностей вихревого эжектора используются аналитические уравнения, позволяющие определить расстояние  $r_{i\Pi j}$  между центром элемента  $i$  и элементарной поверхностью  $j$ .

Помимо механического движения элементов происходит изменение состояния газа в пределах одного элемента. Моделирование изменения состояния газа производится в следующей последовательности:

1) при механическом перемещении элемент по-новому касается соседних элементов, изменяются действующие силы, на основе чего рассчитывается новое значение давления газа в элементе;

2) при изменении давления газа в пределах элемента изменяется объем;

3) рассчитывается новое значение давления рабочего газа с использованием приближения идеального газа и уравнения адиабатного процесса. Адиабатное приближение принято, так как за малый промежуток времени  $\Delta t$  изменение состояния газа выражено сильнее, чем отвод тепла:

$$P_u^\tau = P_u^{\tau-1} \left( \frac{V_u^{\tau-1}}{V_u^\tau} \right)^{\frac{i+2}{i}}, \quad (2)$$

где  $P_u^\tau$  и  $P_u^{\tau-1}$  – давление рабочего газа в пределах элемента на текущем и предыдущем

шагах интегрирования;  $V_u^\tau$  и  $V_u^{\tau-1}$  – объем элемента на текущем и предыдущем шагах интегрирования;  $i$  – количество степеней свободы молекул газа, принятое для выхлопных газов и воздуха равным  $i = 5$ ;

4) изменение объема приводит к изменению радиусов элементов и к новому контакту между элементами, за счет чего возникают силы;

5) под действием результирующей силы элемент совершает элементарное перемещение;

6) на каждом шаге интегрирования  $t$  производится расчет давления на элемент:

$$P_i^\tau = \frac{\sum_{j=1}^{N_\Omega} |\vec{F}_{ij}|}{k_\phi \cdot \pi \cdot d_\Omega^2}, \quad (3)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент формы, позволяющей учесть несплошность заполнения пространства шарообразными объектами.

Рабочие поверхности вихревого эжектора представлены в модели совокупностью фрагментов цилиндрических поверхностей и плоскостей, переходящих друг в друга. В процессе моделирования элементарные поверхности сохраняют неподвижность. Основу эжектора составляют три цилиндрические поверхности: приемная камера, сопло пассивного потока, сопловой ввод (см. рисунок 1). Для того чтобы представить в модели сложную геометрическую конфигурацию спиральной камеры «улитки» и ее переход в диффузор, используется совокупность 522-х элементарных треугольников, стыкующихся между собой.

Если элемент поверхности  $\Pi_j$  контактирует с элементом газа  $i$ , в соответствии с (1) между ними возникают упругие силы и силы трения. Для расчета данных сил необходимо на каждом шаге численного интегрирования определять, контактирует ли элемент газа с треугольным элементом поверхности. Если контактирует, то как именно контактирует: с центральной частью поверхности (вариант I на рисунке 2, б), с ребром (вариант II) или с углом (вариант III). После этого определяется расстояние  $r_{i-\Pi j}$  от центра элемента до плоскости, на основе которого рассчитывается упругая сила отталкивания, а также направление действия силы (отрезок  $E_i - E_{инр}$ , где  $E_i$  и  $E_{инр}$  –

<sup>6</sup> Подвидз Л.Г., Кирилловский Ю.Л. Расчет струйных насосов и установок // Труды ВНИИ Гидромаш. 1968. Вып. 38. С. 44–96.

центр элемента и проекция центра элемента на плоскость элементарной поверхности). В варианте II определяется проекция на ребро, в варианте III в качестве  $E_{inp}$  используется вершина треугольника.

Проверка контакта элемента газа  $i$  с внутренней частью треугольника  $\Pi_j$  (вариант I) осуществляется в два этапа. Определяется проекция центра элемента  $(x_i, y_i, z_i)$  на плоскость треугольного элемента, затем проверяется, попадает ли точка проекции внутрь треугольника. Для определения проекции на основе формул аналитической геометрии составляется уравнение плоскости, заданной через три точки – вершины  $T_{j1}, T_{j2}, T_{j3}$  треугольника

$$\begin{vmatrix} x - x_{j1} & y - y_{j1} & z - z_{j1} \\ x_{j2} - x_{j1} & y_{j2} - y_{j1} & z_{j2} - z_{j1} \\ x_{j3} - x_{j1} & y_{j3} - y_{j1} & z_{j3} - z_{j1} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

где  $x, y, z$  – координаты пробной точки, принадлежащей плоскости;  $x_{j1}, y_{j1}, z_{j1}$  – координаты вершины треугольника  $T_{j1}$ ;  $x_{j2}, y_{j2}, z_{j2}$  – вершины  $T_{j2}$ ;  $x_{j3}, y_{j3}, z_{j3}$  – вершины  $T_{j3}$ . После раскрытия определителя данное уравнение преобразуется к виду

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (5)$$

где  $A, B, C, D$  – параметры уравнения плоскости. Далее уравнение плоскости нормируется делением всех параметров на длину вектора, нормального к плоскости  $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$ :

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0. \quad (6)$$

В дальнейшем нормированные параметры обозначаются индексом «н»:

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (7)$$

На основе нормированного уравнения плоскости рассчитывается расстояние  $r_{i-\Pi j}$  от центра элемента  $(x_i, y_i, z_i)$ :

$$r_{i-\Pi j} = |A_n x_i + B_n y_i + C_n z_i + D_n|. \quad (8)$$

Любой треугольный элемент эжектора касается лишь малого количества (ориентировочно от 0 до 10) элементов газа, поэтому на данном этапе расчета исключаются из рассмотрения все неконтактирующие элементы газа по условию  $r_{i-\Pi j} > d_i/2$ . Благодаря этому существенно ускоряются машинные вычисления.

Для определения взаимодействия элемента с внутренней частью треугольного элемента (по варианту I) сначала определяется проекция центра элемента на плоскость данного треугольника. По известным координатам нормального к треугольнику вектора  $\{A_n, B_n, C_n\}$  и расстоянию  $r_{i-\Pi j}$  от точки до плоскости определяется проекция  $E_{inp}(x_{inp}, y_{inp}, z_{inp})$  путем смещения вдоль нормального вектора

$$\begin{aligned} x_{inp} &= x_i - A_n \cdot r_{i-\Pi j}; \\ y_{inp} &= y_i - B_n \cdot r_{i-\Pi j}; \\ z_{inp} &= z_i - C_n \cdot r_{i-\Pi j}. \end{aligned} \quad (9)$$

Проверка попадания точки  $E_{inp}$  внутрь треугольника  $T_j$  осуществляется путем сравнения площадей треугольников: сумма площадей трех треугольников, построенных на вершинах исходного треугольника и точке  $E_{inp}$ , должна равняться площади всего треугольника  $T_j$ , то есть,

$$S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3}) = S(\Delta E_{inp} T_{j2} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} E_{inp} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} T_{j2} E_{inp}). \quad (10)$$

Когда суммарная площадь треугольников  $\Delta E_{inp} T_{j2} T_{j3}, \Delta T_{j1} E_{inp} T_{j3}, \Delta T_{j1} T_{j2} E_{inp}$  больше площади элементарного треугольника  $S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3})$ , принимается решение, что точка  $E_{inp}$  лежит вне треугольника  $T_j$ . В этом случае элемент газа либо вообще не контактирует с данной элементарной поверхностью, либо может контактировать с ней по ребру или вершине элементарного треугольника, для чего производятся дополнительные аналогичные расчеты.

В случае контакта элемента газа с треугольным элементом поверхности производится расчет сил упругости, сухого и вязкого трения (по формуле (1)).

В начальный момент времени модельный вихревой эжектор равномерно заполняется элементами воздуха. Для создания входного потока воздуха элементы появляются по одному во входной трубе через определенный промежуток времени и под действием образующегося давления движутся в тангенциальном направлении к камере завихрения эжектора.

Разработанная модель позволяет определить влияние геометрических параметров вихревого эжектора, параметров входного потока на показатели эффективности вихревого эжектора, которая определяется коэффициентом эжекции. Данный коэффициент определяется по известному уравнению:

$$u = \frac{Q_{\text{пас}}}{Q_{\text{акт}}}, \quad (11)$$

где  $Q_{\text{пас}}$  и  $Q_{\text{акт}}$  – расход активного и пассивного потоков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования модели разработана компьютерная программа «Программа для моделирования вихревого эжектора со спиральной камерой» (рисунок 3)<sup>7</sup> [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Программа предназначена для моделирования работы вихревого эжектора **со спиральной камерой** и позволяет моделировать движение потоков воздуха в эжекторе на основе метода динамики частиц. В окнах интерфейсной формы задаются основные геометрические параметры вихревого эжектора, скорость и угол входа эжектирующего потока. В процессе работы программа выводит на экран две проекции эжектора и элементов газовой среды, текущие значения параметров процесса (рисунок 4). Программа применима для широких диапазонов геометрических параметров вихревого эжектора, **спиральной камеры** и параметров эжектирующего и эжектируемого потоков [22].

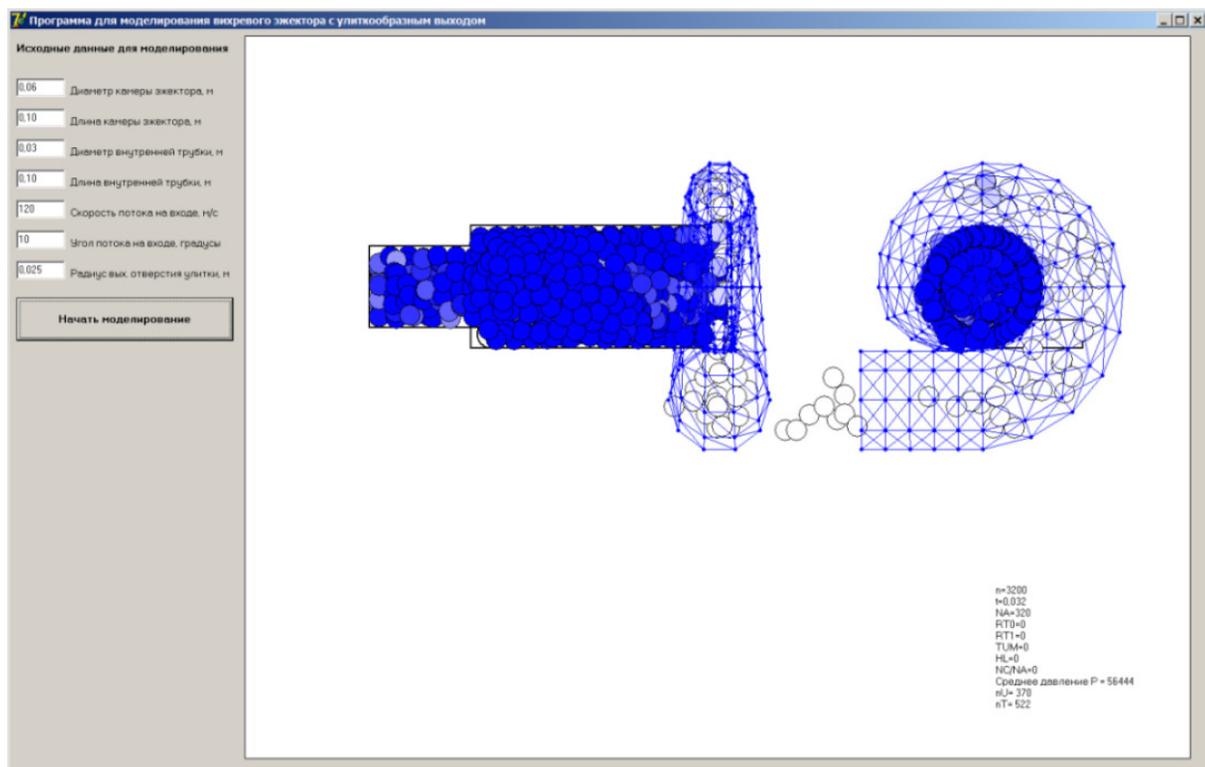


Рисунок 3 – Интерфейсная форма ввода исходных данных для моделирования вихревого эжектора со спиральной камерой и элементов воздушной среды

Figure 3 – Interface form of input of initial data for simulation of vortex ejector with spiral chamber and air medium elements

<sup>7</sup> Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И. [и др.]. Визуализация структуры потока газа в вихревой трубе методом численного моделирования // Мавлютовские чтения: Всеросс. молодеж. науч. конф.: материалы конф. в 5 т. Том 1. Уфа : УГАТУ, 2014. С. 115–116.

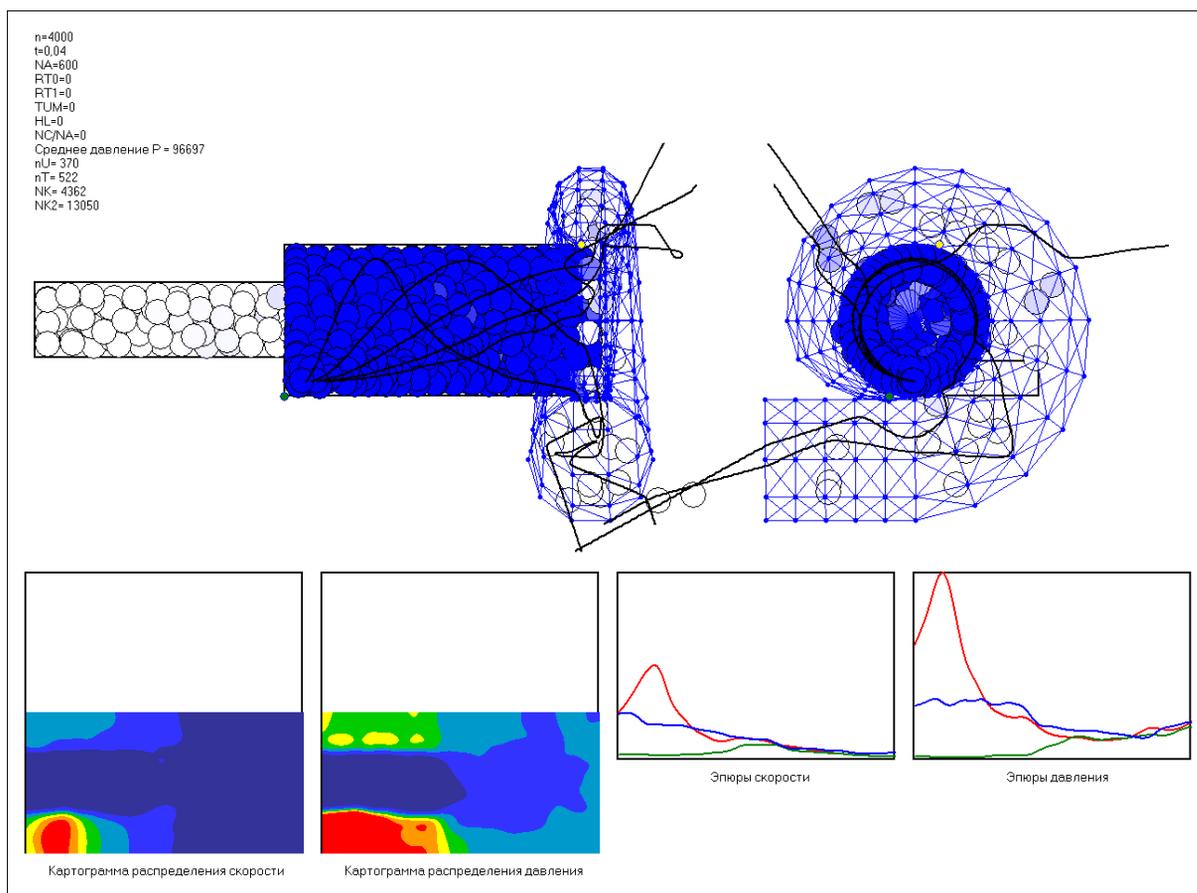


Рисунок 4 – Интерфейсная форма вывода результатов моделирования: двух проекций вихревого эжектора со спиральной камерой и элементов воздушной среды, текущих значений параметров

Figure 4 – Interface form of simulation results output: two projections of vortex ejector with spiral chamber and air medium elements, current values of parameters

Эффективность эжектора оценивается по графическим материалам воспроизводимой программой для ЭВМ. Траектории движения элементов газа позволяют оценить характер вихревого движения газа (см. рисунок 4). Так, на представленной геометрической конфигурации вихревого эжектора, при длине камеры смешения около 60 мм, газ совершает в камере смешения около 1,5 витков, прежде чем уйдет в спиральную камеру «улитку».

Количественные характеристики вихревого движения определяют по картограммам распределения скорости движения газа и давления в камере смешения (см. рисунок 4). Скорость движения газа и давление максимальны у эжектирующего сопла (в нижней левой части картограммы) и минимальны в осевой области у эжектируемого сопла.

Характер изменения скорости и давления внутри камеры смешения исследуется по эпюрам (см. рисунок 4). Так, область газа, движущегося с высокой скоростью (более 100 м/с), имеет протяженность 13 мм в левой части камеры смешения. А область газа, имеющего высокое давление (более 200 кПа), имеет протяженность около 11 мм в левой части камеры смешения.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие в настоящее время методики расчета вихревого эжектора в основном основаны на экспериментальных данных и не дают выбрать конструктивные и режимные параметры, обеспечивающие заданное значение коэффициента эжекции. Предлагаемая математическая модель и реализующая ее

компьютерная программа позволяют количественно оценить эффективность эжектора при его различных конструктивных и технологических параметрах, способствуют оптимальному подбору вихревого эжектора на этапе проектирования комбинированного дизеля.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лашко В.А., Бердник А.Н. Пути совершенствования систем газотурбинного наддува комбинированных поршневых двигателей // Вестник ТОГУ. Хабаровск. 2010. № 4 (18). С. 91–100.
2. Луценко В.А., Хасанов Р.Р., Хайруллин А.Х., Гуреев В.М. Исследование работы элементов турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение М., МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 12 (693). С. 20–29.
3. Тузов Л.В., Бережнев В.И. Анализ теплонапряженности судовых дизелей // Вестник ГУМРФ СПб. 2012. № 4 (16). С. 18–25.
4. Шабалин Д.В., Рослов С.В., Килунин И.Ю., Смолин А.А. Стабилизация параметров наддувочного воздуха с целью обеспечения оптимальных значений коэффициента избытка воздуха в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля // Омский научный вестник. 2014. № 3. С. 102–105.
5. Шабалин Д.В. Повышение эффективности рабочего цикла дизеля оптимизацией температуры заряда воздуха // Сборник научных трудов ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва. СПб: ВУНЦ СВ «ВАМТО», 2017. С. 34 – 40. Инв. № 45707.
6. Мырзахметов Б.А., Кадыров Ж.Н., Кочетков А.В. Силовые энергетические установки // Военный вестник. 2011. № 3. С. 27–29.
7. Малозёмов А.А. Математическая модель двигателя на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов // Научный вестник. Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин. Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. Выпуск 18. С. 8–15.
8. Селиванов Н.И. Потенциальные тяговые характеристики тракторов на снежном покрове // Вестник КрасГАУ: науч.-техн. журн. 2005. Вып. 7. С. 200–207.
9. Prabakaran J., Vaidyanathan S. Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube // Indian Journal of Science and Technology. 2010. Vol. 3, № 4. pp. 374–376.
10. Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Иванов Р.И. Разработка инфракрасного газового горелочного устройства на базе вихревого эжектора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). Самара. 2007. № 2. С. 82–86.
11. Кукис В.С., Шабалин Д.В. Физико-математическая модель вихревых труб для регулирования температуры наддувочного воздуха // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 129–133.

12. Богомолов С.В., Кузнецов К.В. Метод частиц для системы уравнений газовой динамики // Математическое моделирование. 1998. Т. 10. № 7. С. 93–100.

13. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1992. Vol. 30. P. 543–574.

14. Бровченко И.А. Применение методов частиц в задачах с неструктурированными сетками // Математичні машини і системи. 2010. № 3. С. 111–115.

15. Малышев В.Л., Марьин Д.Ф., Моисеева Е.Ф., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш. Ускорение молекулярно-динамического моделирования неполярных молекул при помощи GPU // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 3(1). С. 126–133.

16. Тарасов Д.С., Изотова Е.Д., Алишева Д.А., Акберова Н.И. GPAMM – программный пакет для расчетов молекулярной динамики на графических процессорах // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. № 3. С. 31–40.

17. Кураев А.А., Рак А.О., Колосов С.В., Короновский А.А., Храмов А.Е. Быстрый алгоритм численного интегрирования уравнений движения крупных частиц в приборах СВЧ // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 3. С. 8–13.

18. Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science // Acta Mater. 2000. Vol. 48. Pp. 71–92.

19. Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И. Численное моделирование течения газа в вихревых устройствах // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. № 2(72). С. 66–73.

20. Wu Y.T., Ding Y., Ji Y.B. Experimental research on vortex tube // Journal of Chemical Industry and Engineering. 2005. Vol. 56. Pp. 41–44.

21. Богомолов С.В., Кузнецов К.В. Метод частиц для системы уравнений газовой динамики // Математическое моделирование. 1998. Т. 10. № 7. С. 93–100.

22. Юрченко Д. Численное моделирование течения в вихревой трубе с использованием ANSYS Fluent // ANSYS Advantage. 2009. № 11. С. 35–37.

### REFERENCES

1. Lashko V.A., Berdnik A.N. Puti sovershenstvovaniya sistem gazoturbinnogo nadduva kom-binirovannyh porshnevyyh dvigatelej [Ways to improve gas turbine supercharging systems of combined piston engines]. *Vestnik TOGU*. 2010; 4(18): 91–100 (in Russian).
2. Lushchenko V.A., Hasanov R.R., Hajrullin A.H., Gureev V.M. Issledovanie raboty elementov turbokompressora dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Study of operation of elements of turbo compressor of internal combustion engine]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. Moskva MG TU im. N.E. Bauman. 2017; 12(693): 20–29 (in Russian).
3. Tuzov L.V., Berezhnev V.I. Analiz teplonapryazhennosti sudovyh dizelej [Analysis of heat stress of ship 's diesel engines]. *Vestnik GUMRF*. 2012; 4(16): 18–25 (in Russian).

4. Shabalin D.V., Roslov S.V., Kilunin I.YU., Smolin A.A. Stabilizatsiya parametrov nadduvochnogo vozduha s cel'yu obespecheniya optimal'nyh znachenij koefitsienta izbytko vozduha v shirokom diapazone skorostnyh i nagruzochnyh rezhimov raboty dizelya [Stabilization of inflatable air parameters in order to ensure optimal values of air excess coefficient in a wide range of speed and load modes of diesel engine operation]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2014; 3: 102–105 (in Russian).
5. Shabalin D.V. Povyshenie effektivnosti rabocheho cikla dizelya optimizatsiej temperatury zaryada vozduha [Improving Efficiency of Diesel Operating Cycle by Optimization of Air Charge Temperature]. *Sbornik nauchnyh trudov VA MTO im. Generala armii A.V. Hrulyova*. 2017; 45707: 34–40 (in Russian).
6. Myrzahmetov B.A., Kadyrov Zh.N., Kochetkov A.V. Silovye energeticheskie ustanovki [Power Plants]. *Voennyj vestnik*. 2011; 3: 27–29 (in Russian).
7. Malozymov, A.A. Matematicheskaya model' dvigatelya na osnove sistemy differentsial'nyh uravnenij energeticheskogo i massovogo balansov [Mathematical model of the engine based on the system of differential equations of energy and mass balances]. *Nauchnyj vestnik. Povyshenie effektivnosti silovyh ustanovok kolesnyh i gusenichnyh mashin*. 2006; 18: 8–15 (in Russian).
8. Selivanov N.I. Potentsial'nye tyagovye karakteristiki traktorov na snezhnom pokrove [Potential traction characteristics of tractors on snow cover]. *Vestnik KrasGAU*. 2005; 7: 200–207 (in Russian).
9. Prabakaran J., Vaidyanathan S. Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube. *Indian Journal of Science and Technology*. 2010; 3, no 4: 374–376.
10. Piralishvili Sh.A., Gur'yanov A.I., Ivanov R.I. Razrabotka infrakrasnogo gazovogo gorelochnogo ustrojstva na baze vihrevogo ezhektora [Development of an infrared gas burner device based on a vortex ejector]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2007; 2: 82–86 (in Russian).
11. Kukis V.S., Shabalin D.V. Fizikomatematicheskaya model' vihrevykh trub dlya regulirovaniya temperatury nadduvochnogo vozduha [Physical and mathematical model of vortex pipes for regulation of supercharging air topics]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015; 1: 129–133 (in Russian).
12. Bogomolov S.V., Kuznecov K.V. Metod chastic dlya sistemy uravnenij gazovoj dinamiki [Method of particles for the system of equations of gas dynamics]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1998; 10. No 7: 93–100 (in Russian).
13. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1992; 30: 543–574.
14. Brovchenko I.A. Primenenie metodov chastic v zadachah s nestruktirovannymi setkami [Application of methods of particles in tasks with unstructured grids]. *Matematichni mashini i sistemi*. 2010; 3: 111–115 (in Russian).
15. Malyshev V.L., Mar'in D.F., Moiseeva E.F., Gumerov N.A., Ahatov I.SH. Uskorenie mo-lekulyarno-dinamicheskogo modelirovaniya nepolyarnykh molekul pri pomoshchi GPU [Acceleration of molecular-dynamic modeling of non-polar molecules with the help of GPU]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2014; 3(1): 126–133 (in Russian).
16. Tarasov D.S., Izotova E.D., Alisheva D.A., Akberova N.I. GPAMM – programmnyj paket dlya raschetov molekulyarnoj dinamiki na graficheskikh processorah [GPAMM – software package for calculations of molecular dynamics on graphics processors]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2009; 21. No 3: 31–40 (in Russian).
17. Kuraev A.A., Rak A.O., Kolosov S.V., Koronovskij A.A., Hramov A.E. Bystryj algoritm chislennogo integririrovaniya uravnenij dvizheniya krupnyh chastic v priborah SVCH [Fast algorithm of numerical integration of equations of motion of large particles in microwave devices]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2014; 84. No 3: 8–13 (in Russian).
18. Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science. *Acta Mater*. 2000; 48: 71–92.
19. Ahmetov YU.M., Zangirov E.I. CHislennoe modelirovanie techeniya gaza v vihrevykh ustrojstvah [Numerical simulation of gas flow in vortex devices]. *Vestnik UGATU*. 2016; 20. no 2(72): 66–73 (in Russian).
20. Wu Y.T., Ding Y., Ji Y.B. Experimental research on vortex tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering*. 2005; 56: 41–44.
21. Bogomolov S.V., Kuznecov K.V. Metod chastic dlya sistemy uravnenij gazovoj dinamiki [Method of particles for the system of equations of gas dynamics]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1998; 10. No 7: 93–100 (in Russian).
22. Yurchenko D. Chislennoe modelirovanie techeniya v vihrevoj trube s ispol'zovaniem ANSYS Fluent [Numerical flow simulation in the vortex tube using ANSYS Fluid]. *ANSYS Advantage*. 2009; 1: 35–37 (in Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Якимущин Роман Васильевич – адъюнкт, кафедра боевых гусеничных, колесных машин и военных автомобилей, Филиал военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск (ОАБИИ), ORCID ID 0000-0002-4173-0478 (644098, г. Омск, 14 Военный городок, e-mail: yroman1983v@mail.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman V. Yakimushkin – Postgraduate Student, Army General A.V. Khrulev Military Academy of Logistics, ORCID ID 0000-0002-4173-0478 (644098, Russia, Omsk, 14 Voynyi gorodok, e-mail: yroman1983v@mail.ru).

**РАЗДЕЛ III.  
СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.  
CONSTRUCTION AND  
ARCHITECTURE**

УДК 691

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135>

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ПЕНОБЕТОНОВ

**В.В. Воронов, Е.С. Глаголев***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
г. Белгород, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена особенностям процессов гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих. Проведены комплексные исследования процессов гидратации и структурообразования затвердевших композиционных вяжущих с активными минеральными добавками методами рентгенофазового анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии и электронной микроскопии. При исследовании на растровом электронном микроскопе Tescan MIRA 3 выявлены различия в микроструктуре затвердевших вяжущих и подтверждены результатами микрозондового исследования. Изучена гидратация композиционного вяжущего, приготовленного на основе портландцемента и минеральных компонентов, исследована динамика тепловыделения системы с момента затворения водой и твердения до 72 ч выраженной связью  $dQ/dt=f(t)$  с использованием дифференциального калориметра. Целью работы является изучение особенностей гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов.

**Методы и материалы.** Экспериментальные исследования проводили в БГТУ им. В.Г. Шухова на кафедре строительного материаловедения, изделий и конструкций, Центре высоких технологий, Испытательном центре «БелГТАСМ-сертис». При этом использовали существующие базовые методы исследования, включая современные физико-химические методы анализов: рентгенофазовый, растровой электронной микроскопии и др. Основные характеристики сырьевых компонентов, композиционных вяжущих и пенобетонов на их основе определяли с применением стандартных методик и требований нормативных документов.

**Результаты.** На основании проведенных исследований получены результаты, свидетельствующие об особенностях протекания процессов гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих, полученных на основе портландцемента и минеральных добавок – опоквидного мергеля и золы-уноса.

**Заключение.** На основании проведенных исследований установлены особенности протекания процессов гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих, заключающиеся в том, что введенный в цемент опоквидный мергель приводит к активизации гидратации в индукционный и ускоренный периоды, увеличению полноты гидратации основных клинкерных минералов, благодаря проявлению пуццолановой реакции и активному связыванию блокирующего портландита, а также большей концентрации накопленных новообразований – гидросиликатов кальция второй генерации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полиминеральные композиционные вяжущие, гидратация, твердение, рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия.

**Поступила 30.12.2019, принята к публикации 21.02.2020.**

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

*Для цитирования:* Воронов В.В., Глаголев Е.С. Особенности гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов. *Вестник СибАДИ.* 2020;17(1):122-135. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135>

© Воронов В.В., Глаголев Е.С.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135>

## POLYMINERAL COMPOSITE BINDERS FOR FOAM CONCRETE: FEATURES OF HYDRATION AND HARDENING

Vasily V. Voronov, Evgeny S. Glagolev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Belgorod, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper devotes to the features of hydration and hardening of polymineral composite binders. The authors carry out the complex research of the phase composition, hydration and structure formation processes of hardened composite binders with active mineral additives by X-ray phase analysis, differential scanning calorimetry and electron microscopy. The study using a Tescan MIRA 3 scanning electron microscope reveals differences in the microstructure of hardened binders and the authors confirm the results by microprobe studies. The authors study the hydration of the composite binder prepared on the basis of Portland cement and mineral components. Moreover, the paper demonstrates the dynamics of the system's heat dissipation from the moment of mixing with water and hardening up to 24 hours and up to 72 hours by the expressed bond of  $dQ / dt = f(t)$  using a differential calorimeter.

**Methods and materials.** The authors carried out experimental studies at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, at the Department of Building Materials, Products and Structures, at the High Technology Center and "BelGTASM-Certificate" Test Center. Therefore, the authors used the existing basic research methods, including modern physicochemical methods of analysis: X-ray phase, scanning electron microscopy, etc. The paper determined the main characteristics of raw materials, composite binders and foam concrete using standard methods and regulatory requirements.

**Results.** The authors obtained the results that testified the peculiarities of hydration and hardening processes of polymineral composite binders on the basis of Portland cement and mineral additives: opoka marl and fly ash.

**Conclusion.** The research establishes the hydration and hardening processes of polymineral composite binders. As a result, the authors demonstrate that the opoka marl introduced into the cement leads to the increased hydration in the induction and accelerated periods and also increases the hydration completeness of the main clinker minerals due to the manifestation of the pozzolanic reaction and the active binding of blocking Portlandite, as well as to the higher concentration of accumulated neoplasms, second generation calcium hydrosilicates.

**KEYWORDS:** polymineral composite binders, hydration, hardening, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, differential scanning calorimetry.

Submitted 30.12.2019, revised 21.02.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Voronov V.V., Glagolev E.S. Polymineral composite binders for foam concrete: features of hydration and hardening. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):122-135. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135>

© Voronov V. V., Glagolev E. S.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Ячеистые бетоны автоклавного твердения являются преимущественно конструкционно-теплоизоляционными материалами, но высокая стоимость оборудования не позволяет их производить в рамках малого и среднего бизнеса. Производство пенобетона не требует значительных капиталовложений, но по качеству эти изделия значительно уступают аналогам автоклавного твердения. В настоящее время наиболее актуальным является разработка эффективного вяжущего вещества для производства пенобетона. Эта проблема может быть решена посредством создания композиционных (многокомпонентных) вяжущих на основе портландцемента с использованием эффективных минеральных добавок. Накоплен определенный опыт использования различных природных минеральных добавок, в частности цеолитсодержащих пород для приготовления смешанных вяжущих, но работ по использованию опоковидного мергеля в качестве минерального компонента нет. С целью получения эффективного пенобетона, не уступающего более дорогостоящему автоклавному газобетону, важно создание новейших технологий, которые обеспечивают развитие мелкопористой размеренно распределенной структуры, улучшение прочностных качеств и предотвращение недостатков традиционных технологий.

Разработана широкая номенклатура вяжущих веществ и различных видов бетонов для промышленного, гражданского и дорожного строительства. Оптимизация структуры компонентов как на микро-, так и макроуровне позволяет получить материал с заданными свойствами на местных сырьевых ресурсах и существенным снижением материальных ресурсов<sup>1,2</sup>[1].

Однако вопросу разработки специальных, высокоэффективных композиционных вяжущих для пенобетона, удовлетворяющих возросшим требованиям современной строительной индустрии, уделяется недостаточное внимание. Композиционные вяжущие вещества по составу классифицируются на чисто клинкерные (ВНВ-100) и многокомпонентные с разнообразными органоминеральными добавками.

Решить проблему оптимизации структуры и свойств пенобетона возможно изготовлением композиционных вяжущих с частичной заменой клинкера, используемого в процессе их производства другими полезными минералами, что является выгодным с точки зрения:

- снижения количества природных ресурсов (топлива и сырья), необходимых на 1 т произведенного цемента;
- снижения выбросов парниковых газов (CO<sub>2</sub>) на 1 т произведенного цемента;
- расширения использования минеральных компонентов искусственного (отходов топливной, металлургической промышленности и пр.) или природного происхождения (природные пуццоланы, известняк и пр.);
- применения минеральных компонентов с более низкой размолоспособностью и технологических добавок – интенсификаторов помола, что позволяет снизить удельные энергозатраты на 1 т цемента.

Переход к композиционным вяжущим – это крупный шаг вперед в материаловедении вяжущих веществ, будущее технологий строительных материалов с управлением процессами структурообразования<sup>3</sup> [2, 3, 4, 5, 6].

Применение композиционных вяжущих в производстве бетона приводит к нескольким преимуществам, таким как:

- улучшенные свойства бетонных или растворных смесей (работоспособность, снижение сегрегации и т.д.);
- изменение микроструктуры и состава новообразований, уменьшение капиллярной пористости, размера новообразований и состава гидросиликатов кальция, высокая прочность на сжатие, низкая теплота гидратации и, следовательно, более высокая трещиностойкость и долговечность.

Технологические способы и методы, которые были разработаны на кафедре СММК БГТУ им. В.Г. Шухова по использованию новой сырьевой базы, домолы, интенсивного перемешивания компонентов, применения химических добавок и др. [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], позволяют получать эффективные композиционные вяжущие с расходом цемента значительно ниже, чем для обычных бетонов и растворов.

<sup>1</sup> Гридчин А.М., Лесовик В.С., Гладков Д.И., Сулейманова Л.А. Новые технологии высокопоризованных бетонов // Пенобетон – 2005: материалы Международной научно-практической конференции. Белгород, 2005. С. 6–16.

<sup>2</sup> Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород. М., 2006. 526 с.

<sup>3</sup> Портник А.А. Все о пенобетоне. СПб, 2003. 224 с.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В составе пенобетона в качестве вяжущего применялся портландцемент производства ОАО «Себряковцемент» ЦЕМ I 42,5 Н, ГОСТ 31108–2003. Он удовлетворяет требованиям ГОСТа. Минеральный состав клинкера:  $C_3S$  –  $60\pm 2$ ;  $C_2S$  –  $17\pm 2$ ;  $C_3A$  –  $7,0\pm 1$ ;  $C_4AF$  –  $13\pm 1$ . Тонкость помола цемента 300–340 м<sup>2</sup>/кг.

В качестве кремнеземистого компонента применялся опоковидный мергель Хворостянского района Белгородской области и зола-унос Новотроицкой ТЭС Челябинской области.

Опоковидный мергель представляет собой карбонатно-кремнистую породу, содержащую кальцит 35–38%; смешаннослойные глинистые образования 10–20%; цеолиты 10–20%; опал до 15%. Текстура мергелей изотропная, структура пелитоморфнозернистая, глобулярная, реликтовоорганогенная.

Зола-унос ТЭС – тонкодисперсный материал, образующийся из минеральной части твердого топлива. Химический состав золы характеризуется значительным содержанием оксидов кремния и алюминия, на часть которых приходится свыше 80% от общей массы пробы. Такое значительное содержание оксидов должно содействовать высокой активности золы по отношению к портландцементу. Зола соответствует требованиям ГОСТ 25485–89.

В качестве пластифицирующей присадки – пластификатор Muraplast FK 19 – многофункциональный разбавитель для растворов строительного назначения на базе шлакопортландцемента, портландцемента, глинозема цемента, композиционных вяжущих. Суперпластифицирующая добавка разработана на основе полимера эфиров поликарбоксилатов, порошок белого цвета характеризуется значительной растворимостью в жидкости. Производитель – Германия.

Вода для затворения бетонов должна отвечать ГОСТ 23732–2010. Окисленность воды не может быть больше 15 м<sup>2</sup>/л. Количество органических поверхностно-действующих веществ, сахаров и фенолов, содержащихся в воде, не должно быть больше 10 м<sup>2</sup>/л. Показатель рН не должен быть меньше 4 и более 12,5. Содержание в воде растворимых солей ионов  $SO_4^{2-}$  не более 2700 м<sup>2</sup>/л,  $Cl^{-1}$  не более 1200 м<sup>2</sup>/л, растворимых солей не более 5000 м<sup>2</sup>/л.

В работе использовали следующие методы исследования: рентгенофазовый, растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии и др. Основ-

ные характеристики сырьевых компонентов, композиционных вяжущих и пенобетонов на их основе определяли с применением стандартных методик и требований нормативных документов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксплуатационные характеристики сформировавшихся структур затвердевших композиционных вяжущих характеризуются микроструктурой и составом новообразований. В работе проведены комплексные исследования фазового состава, процессов гидратации и структурообразования затвердевших композиционных вяжущих с активными минеральными добавками методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии. В качестве структурных моделей минеральных компонентов для полнопрофильного количественного рентгенофазового анализа использовались данные ICSD – Inorganic Crystal structure Database. Дифрактограммы гидратированных цемента и композиционных вяжущих в возрасте 28 суток, приготовленные с различными минеральными добавками, представлены на рисунках 1,2.

Выявлено, что основными их составляющими являются: непрогидратированные клинкерные минералы  $C_3S$  – ( $d=2,76; 2,19... \text{Å}$ );  $C_2S$  – ( $d=2,78; 2,74; 2,19... \text{Å}$ ); портландит  $Ca(OH)_2$  – ( $d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79; 1,69... \text{Å}$ ); карбонат кальция  $CaCO_3$  –  $d=3,85; 3,35; 3,04; 2,78; 2,49; 2,28; 2,09; 1,93... \text{Å}$ ); эттрингит – ( $d=9,7; 5,6; 4,92... \text{Å}$ ); частично закристаллизованный тоберморитоподобный гидросиликат кальция  $CSH(\beta)$  –  $d=9,8; 4,9; 3,07; 2,85; 2,80; 2,40; 2,00; 1,83... \text{Å}$ ; гидроалюминаты и гидроферриты кальция, твердые растворы комплексных соединений и др.

При твердении композиционных вяжущих карбонатные минералы могут взаимодействовать с  $C_3A$  и продуктами его гидратации, с образованием гидрокарбоалюминатных фаз –  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$  ( $d=7,6; 3,80; 2,86; 1,66... \text{Å}$ ). Многие отражения новообразований накладываются друг на друга.

Гидратационная активность композиционных вяжущих обеспечивается высокой удельной поверхностью тонких фракций активных минеральных добавок, механохимически активированными поверхностными слоями зерен цемента и минеральных добавок, а также очень тонкими оболочками (порядка 2 мкм), возникающими в процессе гидратации вяжущих на их зернах, что обеспечивает физико-механические показатели.

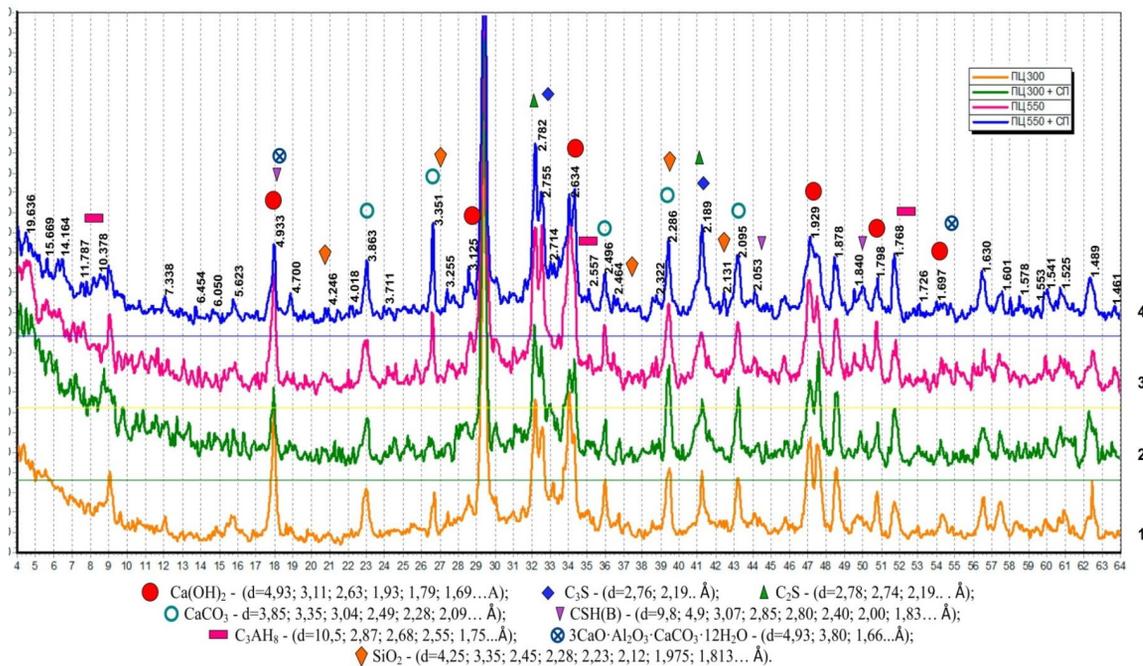


Рисунок 1 – Рентгенограммы гидратированных цементов в возрасте 28 сут:  
 1 – ПЦ (удельная поверхность 324 м<sup>2</sup>/кг); 2 – ПЦ (удельная поверхность 556 м<sup>2</sup>/кг) + СП;  
 3 – ПЦ (удельная поверхность 556 м<sup>2</sup>/кг); 4 – ПЦ (удельная поверхность 556 м<sup>2</sup>/кг) + СП

Figure 1 – Radiographs of hydrated cements at the age of 28 days:  
 1 – PC (specific surface 324 m<sup>2</sup>/kg); 2 – PC (specific surface area 556 m<sup>2</sup>/kg) + SP;  
 3 – PC (specific surface area 556 m<sup>2</sup>/kg); 4 – PC (specific surface area 556 m<sup>2</sup>/kg) + SP

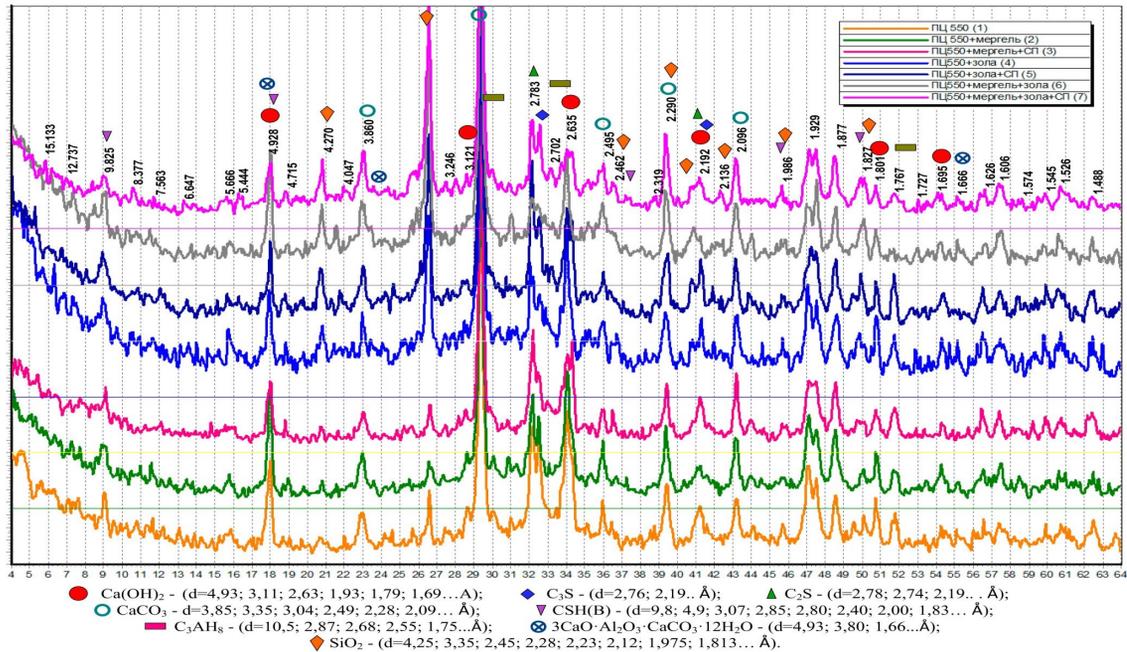


Рисунок 2 – Рентгенограммы гидратированных портландцемента и композиционных вяжущих в возрасте 28 сут:  
 1 – ПЦ (удельная поверхность 556 м<sup>2</sup>/кг); 2 – КВ\* с мергелем; 3 – КВ с мергелем + СП; 4 – КВ с золой;  
 5 – КВ с золой + СП; 6 – КВ с золой + мергель; 7 – КВ с золой + мергель + СП  
 \* – композиционное вяжущее

Figure 2 – Radiographs of hydrated Portland cement and composite binders at the age of 28 days  
 1 – PC (specific surface area 556 m<sup>2</sup>/kg); 2 – KB \* with marl; 3 – HF with marl + SP; 4 – HF with ash;  
 5 – HF with ash + SP; 6 – KV with ash + marl; 7 – HF with ash + marl + SP  
 \* – composite binder

Таблица 1  
Относительная степень гидратации вяжущих по интенсивности дифракционных отражений портландита, алита, белита, этtringита и низкоосновных гидросиликатов кальция

Table 1  
Relative degree of the binders' hydration by the intensity of diffraction reflections of portlandite, alite, belite, ettringite and low-basic calcium hydroxides

№	Вид вяжущего	Относительная интенсивность отражений																																			
		Ca(OH) <sub>2</sub>						C <sub>3</sub> S + C <sub>2</sub> S						Этtringит						CSH (β)																	
		(d=4,93 Å)						(d=2,76 Å)						(d=2,78 Å)						(d=9,89 Å)						(d=2,85 Å)						(d=1,83 Å)					
		S	%	I	%	S	%	S	%	I	%	S	%	S	%	I	%	S	%	I	%	S	%	I	%	S	%	S	%	I	%	S	%	I	%		
1	Ц330	79	100	713	100	125	100	566	100	148	100	709	100	100	100	31	100	243	100	34	100	147	100	53	100	106	100										
2	Ц330+СП	16	20	167	23	52	42	281	50	94	64	333	47	53	170	134	55	37	108	94	64	15	28	82	77												
3	Ц550	38	48	366	51	119	95	503	90	91	62	496	70	19	61	147	61	25	74	126	86	43	81	193	182												
4	Ц550+СП	33	42	314	44	133	106	517	910	101	68	713	101	19	61	118	49	24	71	165	112	7	13	113	106												
5	КВ с 3	24	30	190	26	544	43	193	340	91	62	272	38	23	74	96	40	25	74	113	77	33	62	100	94												
6	КВ с 3+СП	24	30	252	35	69	55	337	60	96	65	525	74	31	100	119	49	70	205	136	93	29	55	151	142												
7	КВ с М	67	85	488	68	71	57	356	63	78	53	452	64	40	129	115	47	119	350	178	121	19	36	125	118												
8	КВ с М+СП	31	39	279	39	87	70	324	57	89	60	531	75	17	55	160	66	16	47	98	67	40	75	78	74												
9	КВ с 3+М	49	62	408	57	84	67	413	74	175	118	242	34	7	23	119	48	20	59	180	122	30	57	169	159												
10	КВ 3+М+СП	32	41	267	37	108	86	456	81	86	58	480	68	21	68	104	43	48	141	151	103	55	66	161	152												

Активные минеральные добавки в составе композиционных вяжущих приводят к увеличению объемной концентрации гидратных новообразований за счет взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с их активными компонентами. О количественном отношении продуктов гидратации можно косвенно судить по интенсивности дифракционных отражений: гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  –  $d=4,93 \text{ \AA}$ ; алита  $\text{C}_3\text{S}$  – ( $d=2,76 \text{ \AA}$ ) и белита  $\text{C}_2\text{S}$  – ( $d=2,78 \text{ \AA}$ ); этtringита – ( $d=9,89 \text{ \AA}$ ); гидросиликатов кальция  $\text{CSH}(\beta)$  – ( $d=2,80; 1,83 \text{ \AA}$ ) – см. рисунки 1,2; таблица 1.

При проведении исследований изучали составы портландцементов и композиционных вяжущих с различными удельными поверхностями и дозировкой суперпластификатора (см. рисунки 1,2).

Было установлено, что в образцах композиционных вяжущих с опоковидным мергелем, золой-уносом и бинарной минеральной добавкой (10% опоковидного мергеля + 40% золы-уноса) интенсивность отражений и количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  убывает в 1,7, 3,3 и 1,6 раза, соответственно (см. рисунок 2, см. таблицу 1). В результате связывания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и вывода его из сферы реакции ускоряется гидролиз клинкерных минералов. В образцах гидратированных композиционных вяжущих количество  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$  (особенно  $\text{C}_3\text{S}$ ) существенно уменьшается в сравнении с цементным камнем, что свидетельствует об активном участии клинкерных

минералов в процессах гидратации (см. рисунок 2, см. таблицу 1).

Одновременно увеличивается количество низкоосновных гидросиликатов кальция типа  $\text{CSH}(\beta)$ , что положительно сказывается на прочности затвердевших композиционных вяжущих (см. рисунок 2; таблица 2).

Количество этtringита в гидратированных композиционных вяжущих с опоковидным мергелем, золой-уносом и бинарной минеральной добавкой по сравнению с цементом снижается. При наличии низкоосновных гидроалюминатов кальция ( $\text{C}_2\text{AH}_8$ ) его образуется в 2 раза меньше, чем из алюминатных фаз с основностью 3–4. При разбавлении цемента минеральной добавкой снижается процентное содержание  $\text{C}_3\text{A}$ .

В присутствии суперпластификатора Muraplast FK 19 в составе композиционных вяжущих с опоковидным мергелем и с бинарной добавкой (зола-уноса + опоковидный мергель) процесс гидратации ускоряется (см. рисунок 2), что приводит к увеличению прочности в сравнении с бездобавочным цементом и подтверждается результатами физико-механических испытаний (см. таблицу 2).

При исследовании на растровом электронном микроскопе Tescan MIRA 3 были выявлены различия в микроструктуре цементного камня, приготовленного на основе композиционных вяжущих и рядового портландцемента (рисунки 3–5).

Таблица 2  
Составы и физико-механические характеристики композиционных вяжущих с суперпластификатором Muraplast FK 19

Table 2  
Compositions and physic-mechanical characteristics of composite binders with the Muraplast FK 19 superplasticizer

№	Состав, %			$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	СП Muraplast FK 19 (0.1%)				
	ПЦ	Мергель	Зола		НГ, %	Ср.схватывания начало/ конец мин	$R_{сж}$ , МПа, в сроки		
							7 сут	28 сут	Про пар
1*	100	-	-	324	27	150/250	19,9	43,5	37,4
2*	100	-	-	556	30	117/205	21,8	48,9	39,3
3	100	-	-	324	18	28/220	19,9	55,3	36,8
4	100	-	-	556	19,5	25/186	21,5	58,4	41,5
5	90	10	-	551	23	15/168	45,3	79,3	51,4
6	60	-	40	549	24,5	23/168	41,7	62,2	46,3
7	50	10	40	552	23	19/169	40,1	72,3	50,2

Примечание: \*составы 1 и 2 – без СП.

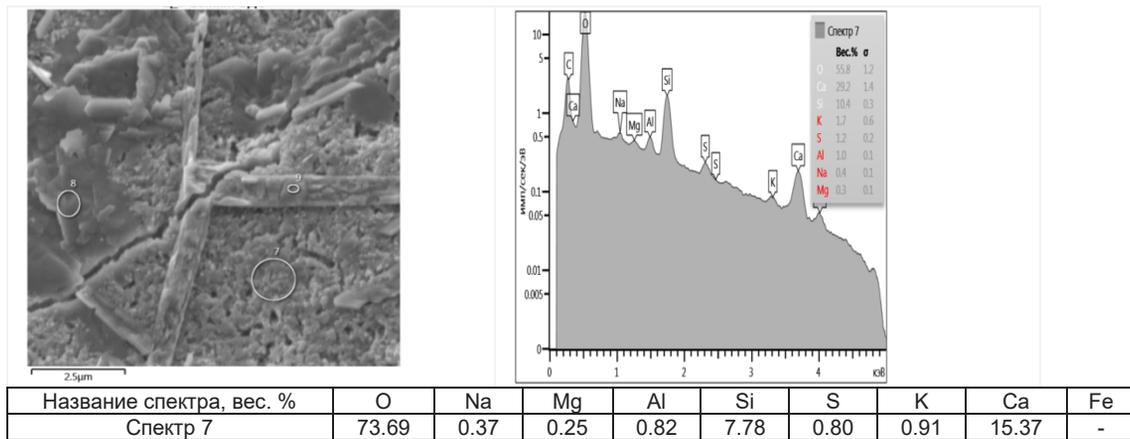


Рисунок 3 – Микроструктура и элементный состав гидратированного цемента в точках микрозондирования

Figure 3 – Microstructure and elemental composition of hydrated cement at microprobe points

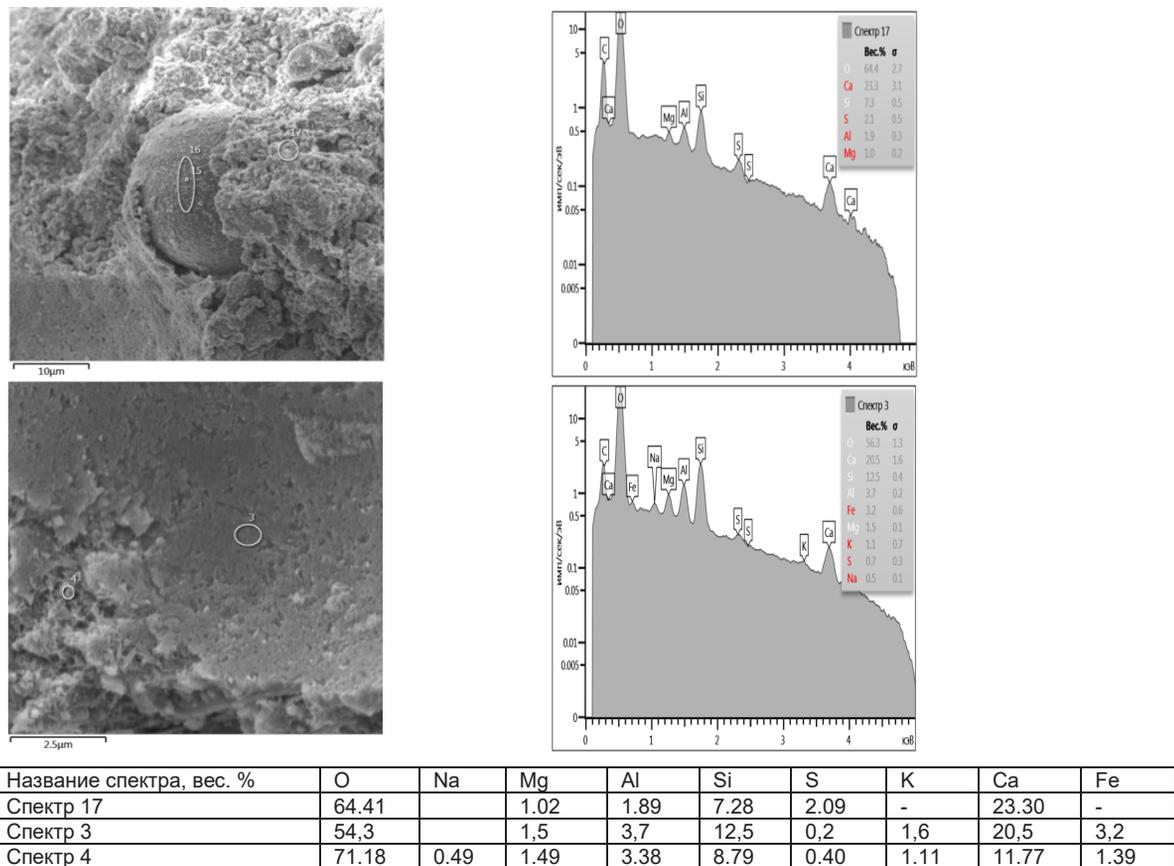
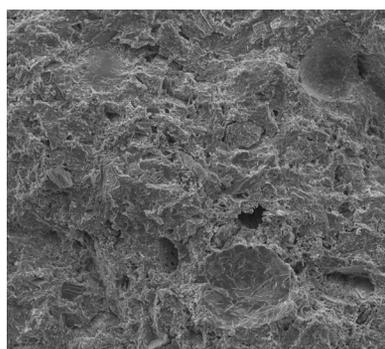
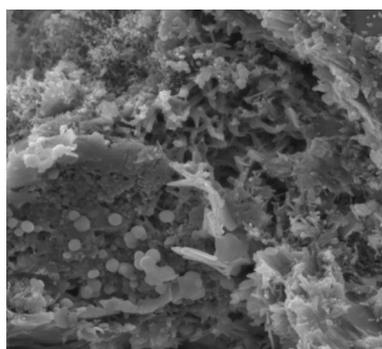


Рисунок 4 – Микроструктура и элементный состав КВ: опоковидный мергель + зола-унос в точках микрозондирования

Figure 4 – Microstructure and elemental composition of HF: opoka marl + fly ash at microprobing points

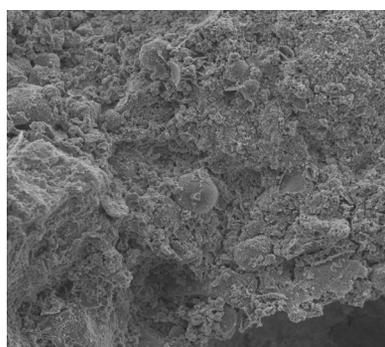


View field: 100.0 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 μm  
BI: 8.00 WD: 9.39 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

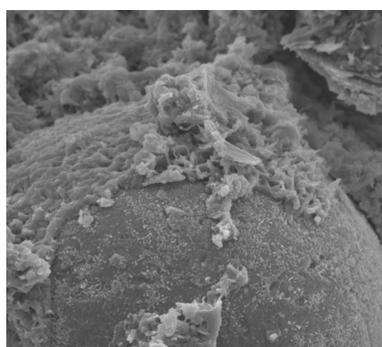


View field: 5.00 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 1 μm  
BI: 8.00 WD: 9.41 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

Микроструктура гидратированного цемента

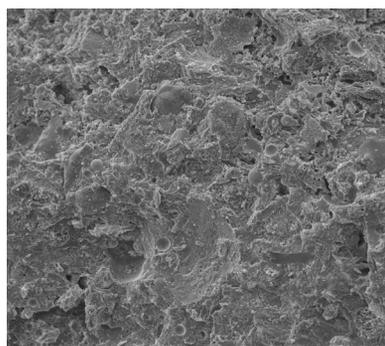


View field: 100.0 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 μm  
BI: 8.00 WD: 8.82 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

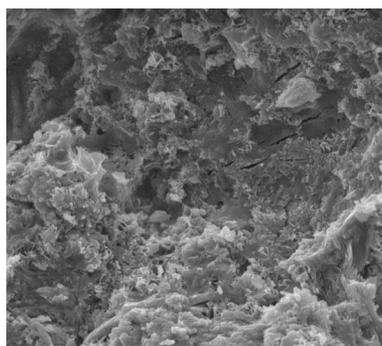


View field: 10.00 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 2 μm  
BI: 8.00 WD: 8.82 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

Микроструктура гидратированных композиционных вяжущих (цемент:зола – 60:40)



View field: 100.0 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 20 μm  
BI: 8.00 WD: 9.10 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 10.00 μm Det: SE MIRA3 TESCAN  
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 2 μm  
BI: 8.00 WD: 9.10 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

Микроструктура гидратированных композиционных вяжущих (цемент:зола:мергель – 50:40:10)

Рисунок 5 – Микроструктуры гидратированных портландцемента и композиционных вяжущих

Figure 5 – Microstructures of hydrated Portland cement and composite binders

В образцах гидратированных композиционных вяжущих образуется более плотная и совершенная, без видимых дефектов, микроструктура в результате кристаллизации различных новообразований, плотно формирующихся на поверхности зерен минераль-

ных добавок, как на подложках. Происходит более густое зарастание межзернового пространства и пор, что приводит к повышению прочности затвердевших композиционных вяжущих по сравнению с гидратированным цементом.

Таким образом, рентгенофазовый анализ и электронные микроскопические исследования продуктов гидратации композиционных вяжущих, содержащих опоковидный мергель и золу-уноса, подтвердили возможность их использования в качестве активных минеральных добавок. Процессы структурообразования цементного камня и затвердевших композиционных вяжущих имеют свои особенности, которые обусловлены формированием низкоосновных гидратных новообразований и интенсивным протеканием ионообменных процессов с участием активных минеральных добавок.

Особый теоретический и практический интерес представляют наиболее сложные ранние стадии твердения композиционных вяжущих с активными минеральными добавками, введение которых оказывает влияние на преобразование во времени характеристик тепловыделения. Поэтому информация о влиянии опоковидного мергеля и золы-уноса на кинетику гидратации композиционных вяжущих на ранних стадиях, а также количественная

оценка эффективности их действия важны в современных технологиях пенобетона, где тепловыделение может сказываться негативно, при этом вызвать нежелательные напряжения и деформации.

Химические процессы при гидратации композиционных вяжущих весьма сложны. Не всегда их можно описать простыми химическими реакциями. Это связано прежде всего с некоторой неопределенностью состава получающихся продуктов гидратации, зависящего от целого ряда условий: влажности, температуры, срока твердения, соотношения клинкерных минералов, наличия примесей и т.д.

Изучались особенности гидратации композиционного вяжущего, приготовленного на основе портландцемента и минерального компонента, исследована динамика тепловыделения системы с момента затворения водой и твердения до 24 ч и до 72 ч выраженной связью  $dQ/dt=f(t)$  с использованием дифференциального калориметра.

Составы проб и результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3  
Характеристики термокинетических показателей

Table 3  
Characteristics of thermokinetic indicators

№ пробы	Компоненты вяжущих	Начало реакции, с	Экзоэффект			Тепловыделение макс. за 72 ч, Дж/г
			Момент достижения	Величина максимума, Дж/г·ч	Тепловыделение, Дж/г	
1	ПЦ*	15	3 мин 47 с	65,11	2,85	234,75
			7 ч 45 мин	59,37	9,34	
2	ПЦ+10 мергель	15	4 мин 06 с	70,08	3,56	196,16
			5 ч 17 мин	57,35	13,06	
3	ПЦ+40 зола-уноса	18	3 мин 13 с	65,96	2,43	186,31
			6 ч 44 мин	47,42	8,89	
4	ПЦ+мергель+зола	22	3 мин 37 с	51,82	2,25	179,02
			7 ч 47 мин	59,55	11,02	

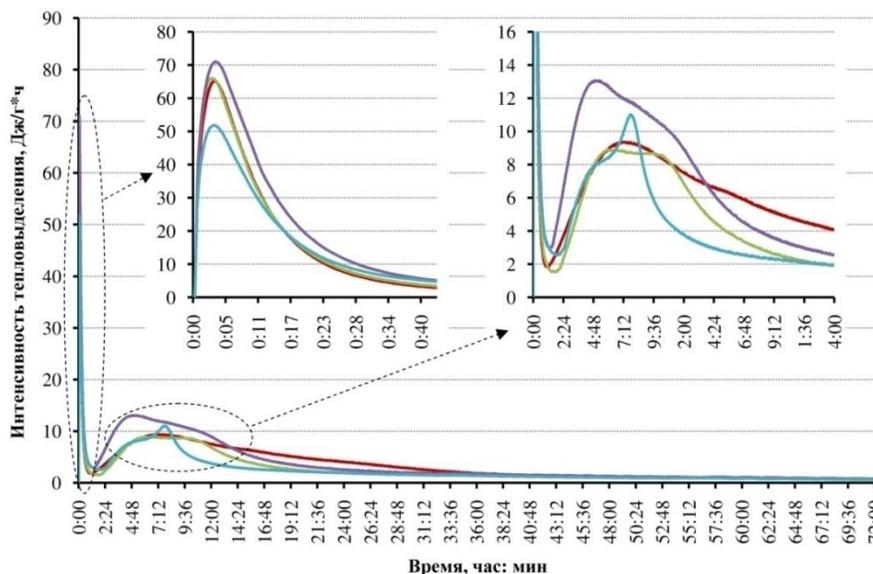
\*ПЦ с удельной поверхностью 330 м<sup>2</sup>/кг, композиционные вяжущие – 550 м<sup>2</sup>/кг.

При анализе термокинетической кривой динамики тепловыделения пробы, содержащей не молотый бездобавочный цемент с удельной поверхностью 330 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 6, проба 1) было установлено следующее.

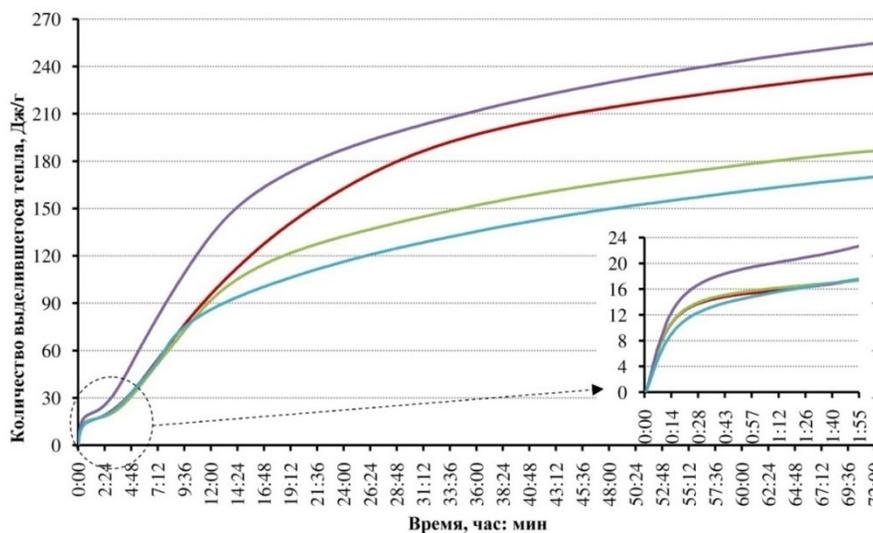
На первой стадии после контакта цемента с водой проявляется реакционная способность и в раствор переходят ионы Ca<sup>+2</sup> и гидроксид-ионы (ОН). Наблюдается интенсивный пик тепловыделения, который обусловлен

взаимодействием с Н<sub>2</sub>О поверхностных слоев частиц твердой фазы – процессами растворения и гидролиза наиболее активных компонентов клинкера, а именно С<sub>3</sub>А, С<sub>4</sub>АF и С<sub>3</sub>S.

На второй стадии скорость реакции очень низкая и наступает индукционный период, который может длиться несколько часов. В это время цементное тесто сохраняет свою пластичность и удобоукладываемость.



а



б

— ПЦ; — ПЦ+ мергель; — ПЦ+зола-уноса; — ПЦ+мергель+зола-уноса

Рисунок 6 – Кинетика тепловыделения при гидратации композиционных вяжущих: а – интенсивность тепловыделения; б – теплота гидратации

Figure 6 – Kinetics of heat during the composite binders' hydration: а – heat dissipation rate; б – heat of hydration

Считается, что первые две стадии, на которые удается воздействовать с помощью добавок, оказывают влияние на последующую гидратацию  $C_3S$ , растворение которого продолжается, рН возрастает до 12,5 и начинается образование небольшого количества силикатов.

На третьей стадии после достижения критической концентрации ионов кальция и гидроксид-ионов реакция протекает активно, с самоускорением, достигая максимальной скорости. Начинается быстрая гидратация  $C_3S$  с образованием  $Ca(OH)_2$  и C-S-H. Время начала схватывания практически совпадает со временем, когда скорость реакции начинает быстро возрастать, а время конца схватывания – с временем завершения третьей стадии.

На четвертой стадии скорость тепловыделения  $C_3S$  постепенно уменьшается, но гидратация продолжается.

На пятой (последней) стадии образуется лишь небольшое количество продуктов гидратации  $C_3S$ .

Анализ термокинетических кривых проб композиционных вяжущих показал, что динамика их тепловыделения имеет иной характер, чем портландцемент (см. рисунок 6).

Продолжительность индукционного этапа и начало активного увеличения гидратной фазы в пробах характеризуются большим содержанием цемента: чем его больше, тем интенсивнее проходят данные этапы. При этом за счет совместного помола механоактивированные частицы кремнеземсодержащих зерен «запускают» пуццолановую реакцию. Образующийся портландит активно вступает во взаимодействие с механоактивированными минеральными добавками, вследствие чего не происходит разделения основного экзотермического эффекта на два. Созданные условия способствуют равномерной кристаллизации новообразований без возникновения внутренних напряжений.

Введение в систему цемента опоковидного мергеля (см. рисунок 6) приводит к активации гидратации в индукционный и ускоренный периоды, увеличению полноты гидратации основных клинкерных минералов благодаря проявлению пуццолановой реакции и активному связыванию портландита, а также большей концентрации накопленных новообразований – гидросиликатов кальция второй генерации.

У составов цемента и композиционных вяжущих с золой-уносом (см. рисунок 6) кривые основного экзотермического эффекта практически совпадают, отмечается наступление

индукционного периода с 9 до 11 ч, замедляющего процесс гидратации композиционных вяжущих. На первичной стадии взаимодействия на поверхности зольных элементов образуется оболочка из кристаллов  $Ca(OH)_2$ , выпавших из раствора воды. Между этой оболочкой и поверхностью частичками золы остается слой воды, который существует продолжительное время, со временем заполняясь продуктами взаимодействия  $Ca^{+2}$ , диффундирующими через слой воды и растворимыми элементами стекловидной части золы. Основными продуктами взаимодействия являются гидросульфат алюмината кальция, потом формируются гидроалюминаты и позже – гидросиликаты кальция. Присутствие водных слоев на зернах золы на ранних этапах не способствует увеличению прочности зольноцементного камня, однако по мере их «зарастания» прочность камня возрастает и способна превышать прочность цементного камня.

Совместное введение рациональных количеств опоковидного мергеля с золой-уносом в цементную систему приводит к увеличению интенсивности протекания гидратации за счет их минеральных составляющих. Проведенные термокинетические исследования согласуются с показателями физико-механических характеристик композиционных вяжущих (см. таблицу 2).

Таким образом, выполненные исследования позволили сформулировать теоретические основы повышения эффективности композиционных вяжущих, заключающиеся в установлении особенностей их структурообразования за счет многокомпонентности вяжущих для повышения эффективности пенобетонов на их основе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными детальными исследованиями была установлена возможность и эффективность применения минеральных добавок природного и техногенного происхождения при производстве композиционных вяжущих для пенобетонов – опоковидного мергеля Хворостянского месторождения и золы-уноса Новотроицкой ТЭС, которые содержат в своем составе рентгеноаморфные вещества, определяющие их гидравлическую активность при взаимодействии с  $Ca(OH)_2$  с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и других новообразований, уплотняющих микроструктуру твердеющей матрицы и, как следствие, повышающих стабильность композиций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зин М.Х., Тихомирова И.Н. Теплоизоляционный материал на основе вспученного перлита и вспененного минерального связующего // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 107.
2. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Sadrtidinov A.R. Thermal insulation properties of wood polymeric sand composite // *Solid State Phenomena*. 2018. T. 284. C. 986–992.
3. Basiurski, J. Wells D. The use of foamed concrete in construction and civil engineering // *Conspectus*. 2001. – pp. 65–73.
4. Евтушенко Е.И., Дороганов В.А., Перетокина Н.А., Зайцева Т.И. Теплоизоляционные материалы, модифицированные нанодисперсным кремнеземом // Новые огнеупоры. 2014. № 8. С. 25–27.
5. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Евтушенко Е.И. Влияние способа помола на энергоемкость изготовления и качественные характеристики композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. Т. 2. № 4. С. 37.
6. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Евтушенко Е.И. Влияние способа помола на энергоемкость изготовления и качественные характеристики композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 37–39.
7. Баженов, Ю.М. Бетон: технологии будущего // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2009. № 8. С. 29–32.
8. Коляда, С.В. Перспективы развития производства строительных материалов в России до 2020 года // Строительные материалы. 2008. № 6. С. 4–7.
9. Вернеке, Д. Энергоэффективное строительство – это мировая тенденция // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 10. С. 40–41.
10. Евстигнеева, Ю.А. История развития ячеистых бетонов в России и за рубежом // Технологии бетонов. 2007. № 3. С. 38–39.
11. Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Чепенко А.С. Особенности процессов гидратации высокодисперсных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 105–113.
12. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers // *Research journal of applied sciences*. 2015. T. 10. No 12. pp. 931–936.
13. Bazhenov Y.M., Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Concerning the role of mineral additives in composite binder content // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. T. 8. No 4. pp. 22649–22661.
14. Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.H., Mestnikov A.E., Kudinova A.I., Sumskey D.A. Designing Of Mortar Compositions On The Basis Of Dry Mixes // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. T. 10. No 5. pp. 12383–12390.
15. Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Чепенко

А.С. Особенности процессов гидратации высокодисперсных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 105–113.

16. Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Елистраткин М.Ю. Новое поколение строительных композитов на основе пеностекла // Строительство и реконструкция. 2015. № 3. С. 146–154.

17. Ramachandran V.S. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, Norwich, New York, 2001.

18. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers // *Research journal of applied sciences*. 2015. T. 10. No 12. pp. 931–936.

19. Шейченко М.С., Лесовик В.С., Алфимова Н.И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 16–19.

20. Вишневская Я.Ю., Лесовик В.С., Алфимова Н.И. Энергоемкость процессов синтеза композиционных вяжущих в зависимости от генезиса кремнеземсодержащего компонента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 53–56.

21. Sun J., Chen Z., Wang Z. Hydration mechanism of composite binders containing blast furnace ferronickel slag at different curing temperatures // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. T. 131. No 3. pp. 2291–2301.

## REFERENCES

1. Zin M.Kh., Tikhomirova I.N. Teploizolyatsionnyy material na osnove vspuchennogo perlita i vspennogo mineral'nogo svyazuyushchego [Heat-insulating material based on expanded perlite and foamed mineral binder]. *Stroitel'nye materialy*. 2019; 1–2: 107 (in Russian).
2. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Sadrtidinov A.R. Thermal insulation properties of wood polymeric sand composite. *Solid State Phenomena*. 2018; 284: 986–992.
3. Basiurski, J. Wells D. The use of foamed concrete in construction and civil engineering. *Conspectus*. 2001: 65–73.
4. Evtushenko E.I., Doroganov V.A., Peretokina N.A., Zaytseva T.I. Teploizolyatsionnye materialy, modifitsirovannye nanodispersnym kremnezemom [Heat-insulating materials modified with nanosized silica]. *Novye ogneupory*. 2014; 8: 25–27 (in Russian).
5. Trunov P.V., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Evtushenko E.I. Vliyanie sposoba pomola na energoemkost' izgotovleniya i kachestvennye kharakteristiki kompozitsionnykh vyazhushchikh [Influence of the grinding method on the energy consumption of manufacturing and quality characteristics of composite binders]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2013; 2. No 4: 37 (in Russian).
6. Trunov P.V., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Evtushenko E.I. Vliyanie sposoba pomola na energoemkost' izgotovleniya i kachestvennye kharak-

teristiki kompozitsionnykh vyazhushchikh [Influence of the grinding method on the energy consumption of manufacturing and quality characteristics of composite binders]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2012; 4: 37–39 (in Russian).

7. Bazhenov Yu.M. Beton: tekhnologii budushchego [Concrete: technologies of the future]. *Stroitel'stvo. Novye tekhnologii Novoe oborudovanie*. 2009; 8: 29–32 (in Russian).

8. Kolyada S.V. Perspektivy razvitiya proizvodstva stroitel'nykh materialov v Rossii do 2020 goda [Prospects for the development of production of building materials in Russia until 2020]. *Stroitel'nye materialy*. 2008; 6: 4–7 (in Russian).

9. Verneke D. Energoeffektivnoe stroitel'stvo – eto mirovaya tendentsiya [Energy-efficient construction is a global trend]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2008; 10: 40–41 (in Russian).

10. Evstigneeva, Yu.A. Istoriya razvitiya yachestnykh betonov v Rossii i za rubezhom [History of the development of cellular concrete in Russia and abroad]. *Tekhnologii betonov*. 2007; 3: 38–39 (in Russian).

11. Zagorodnyuk L.Kh., Sumskey D.A., Chepenko A.S. Osobennosti protsessov gidratatsii vysokodispersnykh vyazhushchikh [Features of hydration processes of highly dispersed binders]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2018; 12: 105–113 (in Russian).

12. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers [Control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers]. *Research journal of applied sciences*. 2015; 10. No 12: 931–936 (in Russian).

13. Bazhenov Y.M., Zagorodnyuk L.H., Lesovik V.S., Yerofeyeva I.V., Chernysheva N.V., Sumskey D.A. Concerning the role of mineral additives in composite binder content. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016; 8. No 4: 22649–22661.

14. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Mestnikov A.E., Kudinova A.I., Sumskey D.A. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10. No 5: 12383–12390.

15. Zagorodnyuk L.Kh., Sumskey D.A., Chepenko A.S. Osobennosti protsessov gidratatsii vysokodispersnykh vyazhushchikh [Features of hydration processes of highly dispersed binders]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2018; 12: 105–113 (in Russian).

16. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vaysera S.S., Elistratkin M.Yu. Novoe pokolenie stroitel'nykh kompozitov na osnove penostekla [New generation of building composites based on foam glass]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015; 3: 146–154 (in Russian).

17. Ramachandran V.S. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, Norwich, New York, 2001.

18. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the

use of multifunctional modifiers. *Research journal of applied sciences*. 2015; 10. No 12: Pp. 931–936.

19. Sheychenko M.S., Lesovik V.S., Alfimova N.I. Kompozitsionnye vyazhushchie s ispol'zovaniem vysokomagnezial'nykh otkhodov Kovdorskogo mestorozhdeniya [Composite binders using high magnesian waste from the Kovdor deposit]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2014; 4: 16–19 (in Russian).

20. Vishnevskaya Ya.Yu., Lesovik V.S., Alfimova N.I. Energoemkost' protsessov sinteza kompozitsionnykh vyazhushchikh v zavisimosti ot genezisa kremnezemsoderzhashchego komponenta [Energy intensity of the synthesis of composite binders, depending on the genesis of the silica-containing component]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2011; 3: 53–56 (in Russian).

21. Sun J., Chen Z., Wang Z. Hydration mechanism of composite binders containing blast furnace ferromagnetic slag at different curing temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018; 131. No 3: 2291–2301.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Воронов Василий Васильевич – 50 %.

Глаголев Евгений Сергеевич – 50 %.

## AUTHORS' CONTRIBUTION

Vasily V. Voronov – 50 %.

Evgeny S. Glagolev – 50 %.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воронов Василий Васильевич – соискатель кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID 0000-0002-8499-190X (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: voronoff\_82@mail.ru\*).

Глаголев Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного и гражданского строительства. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID 0000-0002-9011-7282 (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: sk31.es@gmail.com).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasily V. Voronov – Applicant at the Department of Building Materials Science, Products and Structures. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID 0000-0002-8499-190X (Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St., e-mail: voronoff\_82@mail.ru\*).

Evgeny S. Glagolev – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of the Industrial and Civil Construction, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID 0000-0002-9011-7282 (Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St., e-mail: sk31.es@gmail.com).

УДК 624.271

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149>

## УЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ В РАСЧЕТАХ СОСТАВНЫХ ПРОГОНОВ ИЗ БРЕВЕН

В.А. Уткин, П.Н. Кобзев, Е.Г. Шатунова  
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,  
г. Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Изучение опыта проектирования и строительства балочных мостов с составными бревенчатыми прогонами указывает на возможность увеличения несущей способности этих конструкций и дальнейшего использования их в строительстве мостов на автомобильных дорогах IV и V категорий под нагрузки А-11 и Н-11. Цель данной работы – на реальном примере расчета составного прогона оценить влияние учета продольных сил и изгибающих моментов на величину и распределение сдвигающих усилий в связях сдвига с учетом их допустимой податливости закрепления в древесине и на характер изменения напряженного состояния в стержнях составного прогона.

**Материалы и методы.** Конструкция составного прогона представлена в виде трех рядов, объединенных посредством стяжных болтов и прокладок четырехъярусных однорядных составных прогонов из окантованных бревен.

В основу предлагаемого метода исследования напряженно-деформированного состояния составного прогона с дискретным размещением в швах сосредоточенных связей сдвига принят классический метод сил для стержневых систем, учитывающий взаимодействие продольных сил и изгибающих моментов, возникающих в составляющих прогон стержнях от неизвестных усилий в связях сдвига.

**Результаты.** Определение единичных перемещений при совместном учете деформаций изгиба и растяжения-сжатия оказывает существенное влияние на перераспределение сдвигающих усилий в сторону увеличения их в приопорных зонах и уменьшения в середине пролета, а следовательно, и на конструкцию соединительных элементов. Характер распределения нормальных напряжений с учетом деформаций растяжения-сжатия свидетельствует о работе стержней прогона на участках между связями сдвига по законам внецентренного сжатия (растяжения).

**Заключение.** Предлагаемые решения позволяют наиболее точно оценить работу составных прогонов в конструкциях пролетных строений деревянных мостов и возможность их применения в современных условиях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** составные прогоны из бревен, гребенчатые нагельные соединения, смятие нагельного гнезда, несущая способность нагеля, податливость цилиндрических нагелей.

Поступила 06.06.2019, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г. Учет взаимодействия продольных сил и изгибающих моментов в расчетах составных прогонов из бревен. Вестник СибАДИ. 2020;17(1):136-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149>

© Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149>

## COMPOUND RUNS OF LOGS CALCULATION: ACCOUNTING OF LONGITUDINAL FORCES' AND BENDING MOMENTS' INTERACTION

Vladimir A. Utkin, Pavel N. Kobzev, Elena G. Shatunova  
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),  
Omsk, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** Studying the designing and constructing experience of beam bridges with composite log girders indicates the possibility of the load bearing capacity rising of the structures and their further usage in the IV and V categories bridges' construction under A-11 and H-11 loads. The purpose of the research is to evaluate the effect on the magnitude and distribution of shear forces in shear bonds, considering the permissible pliability of fixation in wood and on the nature of the stress state change in the rods of the composite girders.

**Materials and methods.** The authors presented the construction of the composite girder in the form of three rows united by means of tie bolts and gaskets of four-tier single-row composite girders and made of edged logs.

The proposed studying method of a composite girder stress-strain state with discrete placement of concentrated shear bonds in the joints based on the classical method of forces for rod systems, taking into account the interaction of longitudinal forces and bending moments arising in the rods composing the girder of unknown forces in the shear bonds.

**Results.** The determination of single displacements with joint account of bending and stretching-compression deformations has a significant impact on the redistribution of shear forces in the direction of increasing them in the support zones and reducing them in the middle of the span, and, consequently, on the design of the connecting elements. The character of distribution of normal stresses on the stretching-compression indicated the rods' girders between relationships under the eccentric compression (stretching).

**Discussion and conclusions.** The proposed solutions demonstrate the most accurate assessment of the composite girders in the structures of spans wooden bridges and present the application possibility in modern conditions.

**KEYWORDS:** composite girders of logs, combed nipples, crushing of the jack socket, load bearing capacity, yielding of the cylindrical pins.

Submitted 06.06.2019, revised 21.02.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Utkin Vladimir A., Kobzev Pavel N., Shatunova Elena G. Compound runs of logs calculation: accounting of longitudinal forces' and bending moments' interaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):136-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149>

© Utkin V. A., Kobzev P. N., Shatunova E. G.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Во все времена основой обеспечения жильем населения нашей страны было деревянное домостроение. Об этом свидетельствуют образовавшиеся на протяжении веков и ныне действующие поселения в виде деревень, сел, малых и больших городов. Люди умели строить из бревен добротные дома и вместе с ними другие сложные сооружения<sup>1, 2</sup>.

Широкое распространение получили деревянные мосты, основным материалом которых был круглый лес, наиболее доступный в виде бревен диаметром от 18 до 32 мм и длиной до 8,5 м<sup>2</sup>. Достаточно отметить, что к середине прошлого столетия около 90% общего количества мостов на автомобильных дорогах страны были бревенчатыми. При этом большинство из них уже тогда не соответствовали возрастающим автомобильным нагрузкам, требовали или совершенствования, или замены.

На смену мостам из обычного пиломатериала и бревен в то время стали проектировать и строить мосты с использованием клееной древесины и железобетона [1]. Первый мост с клееными балками в нашей стране был сооружен в 1964 году, в последующие 10–15 лет было построено немногим более сотни таких мостов<sup>3</sup> [1]. В дальнейшем применение клееной древесины в мостостроении было свернуто, а деревянные мосты на дорогах, как не отвечающие предъявляемым к капитальным мостам требованиям, стали повсеместно заменяться железобетонными. Исключение составили лишь мосты на лесных и сельских дорогах, где применялись устаревшие конструкции и решения. К сожалению, такое положение сохраняется до наших дней.

За бортом развития современного мостостроения оказался опыт массового применения древесины. Материал, который постоянно воспроизводится природой и который столетиями обеспечивал потребности населения нашей страны в транспортных сооружениях, стал мало востребованным или востребованным только в дорогом исполнении на основе зарубежных технологий [1, 2].

Изучение опыта проектирования и строительства балочных мостов с составными бревенчатыми прогонами указывает на возможность увеличения несущей способности этих конструкций и дальнейшего использования их в строительстве мостов на автомобильных дорогах IV и V категорий под нагрузки А-11 и Н-11 [3, 4, 5, 6].

В работе [7] рассмотрена конструкция пролетного строения моста с составными прогонами из бревен, разработана методика расчета составного прогона пролетом 15 м с сосредоточенными связями сдвига и определения усилий сдвига без учета продольных сил в стержнях основной системы (рисунок 1). Оценке влияния взаимодействия продольных сил и изгибающих моментов в расчетах составных прогонов из бревен посвящена настоящая статья.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Отличительной особенностью предлагаемой конструкции [Свидетельство на полезную модель № 29938. Пролетное строение с составными прогонами из бревен /Патентообладатель: ООО «Проектно-исследовательская фирма ПИК» – 10.06.2003] является соединение составляющих стержней (бревен) по высоте посредством сосредоточенных связей в форме гребенчатых нагельных соединений [7].

Конструкция составного прогона (см. рисунок 1) представлена в виде трех рядов, объединенных посредством стяжных болтов и прокладок четырехъярусных однорядных составных прогонов из окантованных бревен.

Работа гребенчатых нагельных соединений в составном прогоне рассмотрена в соответствии с работой цилиндрических нагелей в деревожелезобетонных балках пролетных строений<sup>4, 5</sup> [8, 9, 10]. Результаты испытаний финских исследователей нагельных соединений, предназначенных для объединения железобетонной плиты и клееных балок [11, 12, 13], это решение также подтверждают. При этом оценка влияния защемления глухих нагелей в железобетонной плите сопоставимо с оценкой защемления их в стальной пластине [14, 15].

<sup>1</sup> Иванов В.Ф. Деревянные конструкции. М.: Стройиздат, 1956. 317 с.

<sup>2</sup> Гибшман Е.Е. Проектирование деревянных мостов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1976. 272 с.

<sup>3</sup> Стуков В.П. Деревожелезобетонные балочные мосты на автомобильных дорогах. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск, 2009. 453 с.

<sup>4</sup> Кулиш В.М. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979. 160 с.

<sup>5</sup> Донченко В.Г. Нагельные соединения в автодорожных мостах. М., Дориздат, 1952. 56 с.

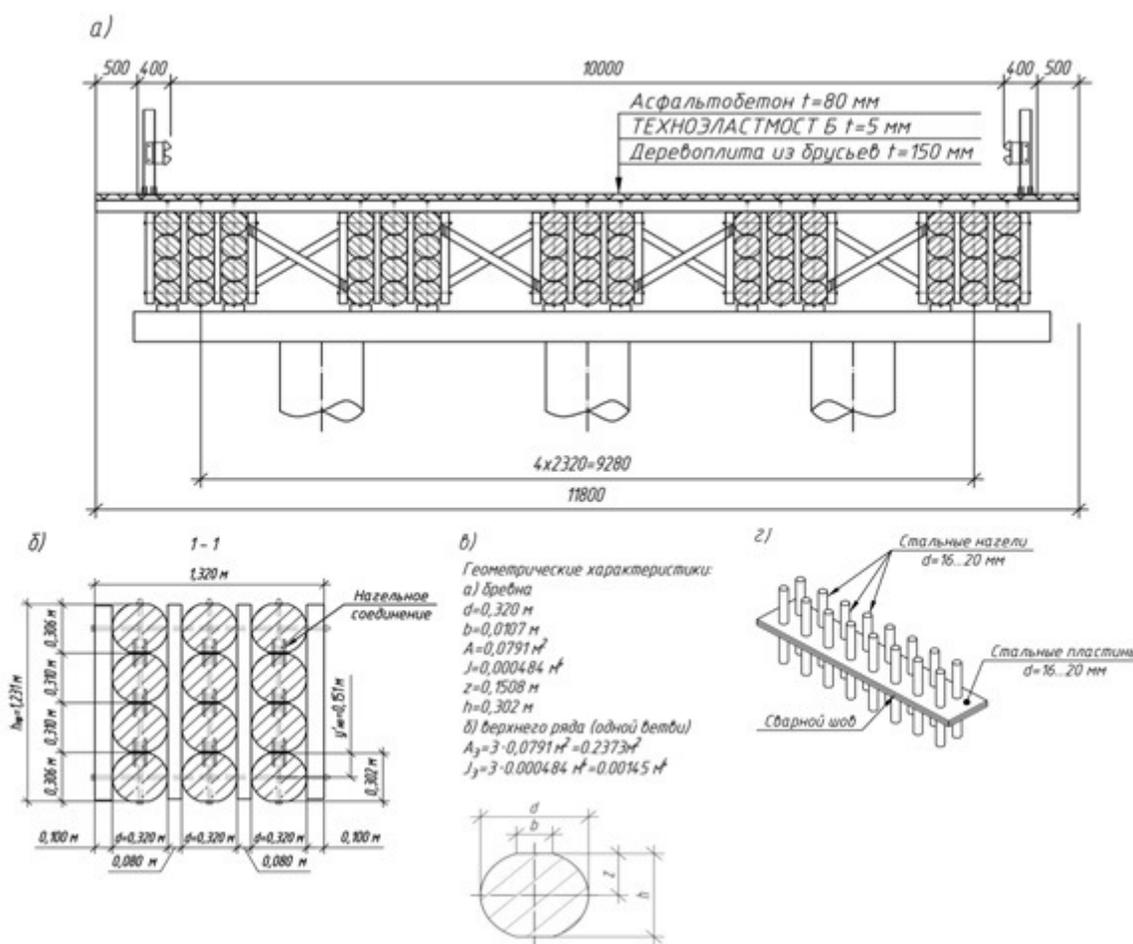


Рисунок 1 – Конструкция пролетного строения с составными прогонами из бревен: а – поперечное сечение пролетного строения; б – поперечное сечение составного прогона; в – геометрические характеристики бревна и верхнего ряда составного прогона; г – конструкция гребенчато-нагельного соединения

Figure 1 – Design of the superstructure with composite runs of logs: а – cross section of the superstructure; б – cross-sectional composite shoulder strap; в – geometrical characteristics of the log and the top row of the composite shoulder straps; г – design comb – arcery connection

Отличающиеся мощностью, размещением по длине прогона сосредоточенные связи сдвига содержат определенное количество жестко закрепленных в стальных пластинах глухих цилиндрических нагелей, установленных в отверстиях сопрягаемых бревен. При этом существенное увеличение несущей способности, как доказано в работе<sup>6</sup>, обеспечивает применение вклеенных нагелей.

После сборки и объединения состава бревен стяжными болтами кромки зеркально совмещенных пластин объединяются свар-

кой. Несмотря на жесткое соединение связей сдвига между собой посредством сварки кромок стальных пластин необходимо учитывать также влияние податливости цилиндрических нагелей, заземленных в древесине гнезда нагеля.

Впервые в отечественной литературе встречаются предпосылки учета податливости соединений в статье Г.В. Никитина [16]. Особое внимание заслуживают работы П.А. Дмитриева, посвященные вопросам совершенствования клееных деревянных конструкций

<sup>6</sup> Кормаков Л.И., Валентиновичус А.Ю. Проектирование клееных деревянных конструкций. Киев: Будивельник, 1983. 152 с.

и их соединений [17]. Вопросам расчета деревянных конструкций с учетом деформативности податливых связей посвящены работы Б.В. Лабутина [18, 19].

Учет податливости нагельных соединений выполнен в соответствии с результатами исследований В.И. Кулиша<sup>7</sup> [9, 10].

С точки зрения строительной механики, «сплошной» составной стержень со стержнями, непосредственно примыкающими друг к другу, принципиально не отличается от «сквозного» стержня. Вместе со связями сдвига и поперечными связями он представляет собой внутренне статически неопределимую двухпорную балку. Основная система метода сил может быть представлена в виде системы отдельных примыкающих стержней, лишенных связей сдвига, действие которых заменено неизвестными усилиями сдвига. Общие положения теории расчета таких составных стержней разработаны в трудах А.Р. Ржаницына<sup>8, 9</sup> [20], где принято непрерывное распределение связей сдвига по длине швов с заменой их в основной системе функциональными неизвестными погонных сдвигающих усилий, а условия эквивалентности основной и заданной систем представлены в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка. После определения усилий в связях сдвига основная система рассчитывается без особых осложнений.

Данная методика расчета, допускающая равномерное и непрерывное распределение связей сдвига и постоянные коэффициенты

жесткости шва, позволяет получать суммарные для каждого шва сдвигающие силы, что может быть допущено по утверждению автора для коротких стержней. Определенные сложности применения данной методики возникают при увеличении количества швов в составном стержне, что присуще рассматриваемым конструкциям прогонов.

В основу предлагаемого метода исследования напряженно-деформированного состояния составного прогона с дискретным размещением в швах сосредоточенных связей сдвига принят классический метод сил для стержневых систем, учитывающий взаимодействие продольных сил и изгибающих моментов, возникающих в составляющих прогон стержнях от неизвестных усилий в связях сдвига. Принципиальная расчетная схема и основная система составного прогона приведена на рисунке 2.

Основная система составного прогона из бревен (рисунок 2, в) представлена в виде осевых линий бревен (стержней 1,2,3...n) с абсолютно жесткими консольными выступами длиной 0,5 высоты бревна с защемлениями по центру установки связей сдвига. Такое представление расчетной схемы позволяет рассматривать работу каждого стержня под воздействием внешней нагрузки, продольных сил и изгибающих моментов, вызванных неизвестными усилиями в связях сдвига.

В общем случае система канонических уравнений метода сил принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \delta_{11} \cdot T_1 + \delta_{12} \cdot T_2 + \dots + \delta_{1n} \cdot T_n + \Delta_{1F} + \Delta_{1\Delta} &= 0 \\ \delta_{21} \cdot T_1 + \delta_{22} \cdot T_2 + \dots + \delta_{2n} \cdot T_n + \Delta_{2F} + \Delta_{2\Delta} &= 0 \\ \dots & \\ \delta_{n1} \cdot T_1 + \delta_{n2} \cdot T_2 + \dots + \delta_{nn} \cdot T_n + \Delta_{nF} + \Delta_{n\Delta} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

В матричной форме ее можно представить в следующем виде:

$$A\vec{T} + \vec{\Delta}_F + \vec{\Delta}_\Delta = 0 \tag{2}$$

<sup>7</sup> Кулиш В.М. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. Там же.

<sup>8</sup> Ржаницин А.Р. Составные стержни на упругоподатливых связях. В кн. «Исследование прочности и устойчивости деревянных стержней». М.: Стройиздат, 1940. С. 140–178.

<sup>9</sup> Ржаницин А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1948. 192 с.

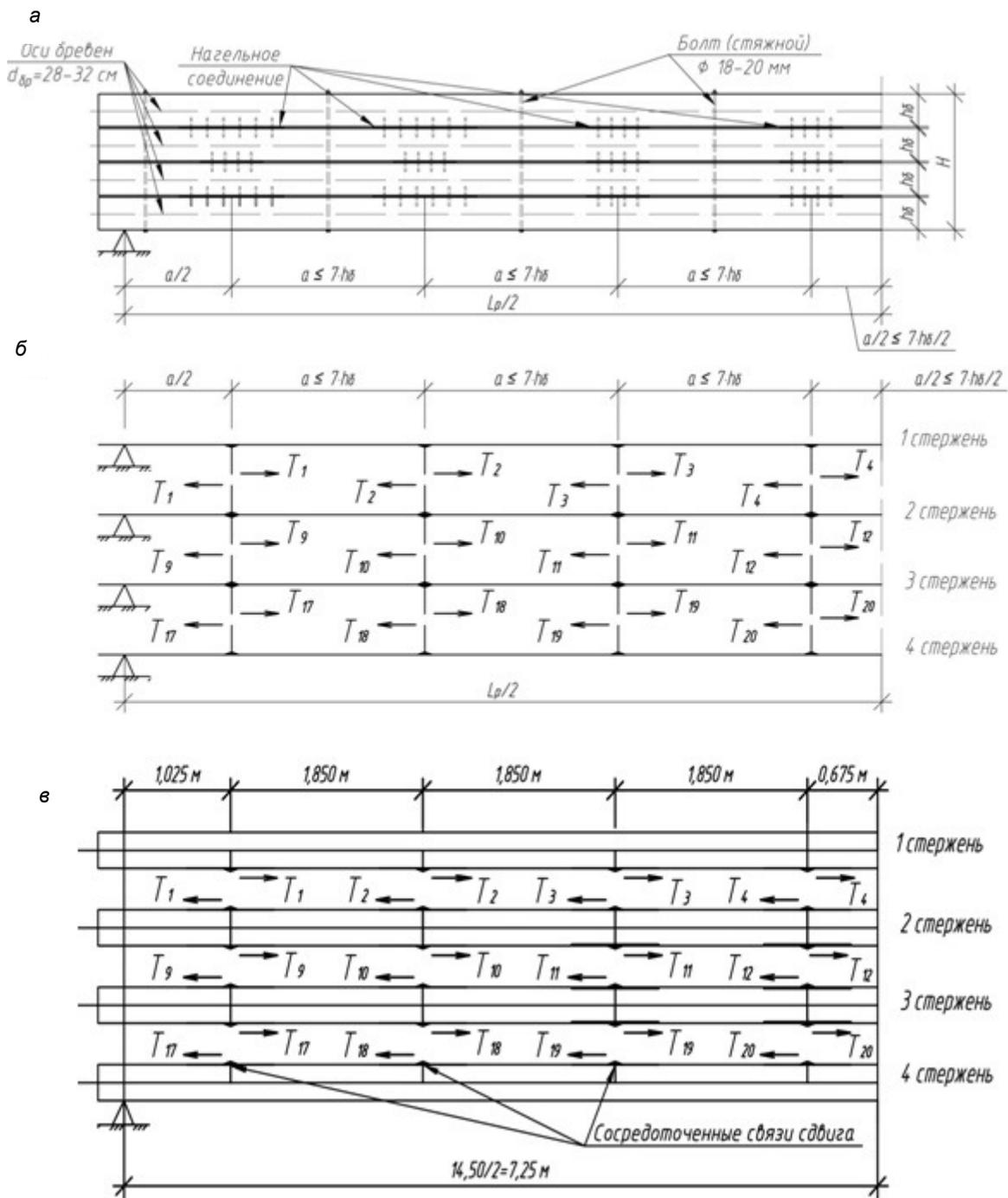


Рисунок 2 – Расчетная схема и основная система составного прогона

Figure 2 – Design scheme and the main system of the composite run

Здесь

$$A = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nn} \end{bmatrix}, \bar{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix}, \bar{\Delta}_F = \begin{bmatrix} \Delta_{1F} \\ \Delta_{2F} \\ \dots \\ \Delta_{nF} \end{bmatrix}, \bar{\Delta}_F = 0,1$$

где  $A$  – матрица коэффициентов канонических уравнений,  $\bar{T}$  – вектор неизвестных усилий сдвига,  $\Delta_F$  – вектор грузовых перемещений,  $\Delta_F$  – вектор одинаковых перемещений (податливость глухих нагелей в гнездах древесины, принятая равной 0,1 см)<sup>10</sup> [5, 6].

Коэффициенты при неизвестных и свободные члены уравнений (1) с учетом деформаций растяжения (сжатия), сдвига и изгиба определяются по известным формулам Мора (3, 4):

$$\delta_{ij} = \int \frac{\bar{N}_i \cdot \bar{N}_j}{EA} ds + \int \frac{\bar{Q}_i \cdot \bar{Q}_j}{GA/k} ds + \int \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_j}{EI} ds, \quad (3)$$

$$\Delta_{iF} = \int \frac{\bar{N}_i \cdot N_F}{EA} ds + \int \frac{\bar{Q}_i \cdot Q_F}{GA/k} ds + \int \frac{\bar{M}_i \cdot M_F}{EI} ds. \quad (4)$$

Вместе с тем при рассмотрении систем определенных типов систем некоторые слагаемые перемещений могут быть опущены. Так, например, в работах<sup>11, 12, 13</sup> показано, что при определении единичных и грузовых перемещений в рамах и балках можно пренебрегать деформациями растяжения-сжатия и поперечного сдвига. В расчетах шарнирных ферм допускается пренебрегать деформациями изгиба и сдвига и не рекомендуется пренебрегать деформациями растяжения-сжатия.

В случае расчета составных прогонов из бревен необходим учет влияния на напряженно деформированное состояние составляющих прогон стержней и изгибающих моментов, а также продольных сил. При этом деформации поперечного сдвига, влияние которых не превышает 1%, могут быть опущены.

Определение искомых перемещений  $\delta_{ij}$  и

$\Delta_{iF}$  может быть выполнено по методу А.К. Верещагина. С этой целью необходимо построить комплект единичных  $\bar{M}_i$  и  $\bar{N}_i$  и грузовых эпюр  $M_{iF}$  для основной системы составного прогона. Общий вид единичных эпюр от парных неизвестных  $\bar{T}_i$  и грузовых  $M_{iF}$  представлен на рисунке 3. При этом значения расчетных моментов в сечениях составного прогона от действующих нагрузок распределены между отдельными стержнями основной системы прогона поровну. В результате выполнения расчетных операций может быть сформирована матрица коэффициентов при неизвестных усилиях сдвига  $T_i$  и вектор грузовых перемещений  $\bar{\Delta}_F$ .

Цель данной работы – на реальном примере расчета составного прогона оценить влияние учета продольных сил и изгибающих моментов на величину и распределение сдвигающих усилий в связях сдвига с учетом их допустимой податливости закрепления в древесине прогонов и на характер изменения напряженного состояния в стержнях составного прогона.

В качестве примера был рассмотрен составной прогон на рисунках 1 и 2 в составе пролетного строения длиной 15 м на действие автомобильной нагрузки А-11.

Особенностью конструкции составного прогона из бревен на рисунке 1 является такое размещение в швах сосредоточенных связей сдвига, при котором расстояние между связями из условий устойчивости ветвей внецентренно сжатых элементов не должны превышать семикратной высоты одиночного стержня [СП 35.13330.2011 Мосты и трубы (Актуализированная редакция СНиП 2.05.03.84) М.: 2011 п.10.31].

<sup>10</sup> Кулиш В.М. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979. 160 с.

<sup>11</sup> Донченко В.Г. Нагельные соединения в автодорожных мостах. М., Дориздат, 1952. 56 с.

<sup>12</sup> Кормаков Л.И., Валентинавичус А.Ю. Проектирование клееных деревянных конструкций. Киев: Будивельник, 1983. 152 с.

<sup>13</sup> Кулиш В.М. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. Там же.

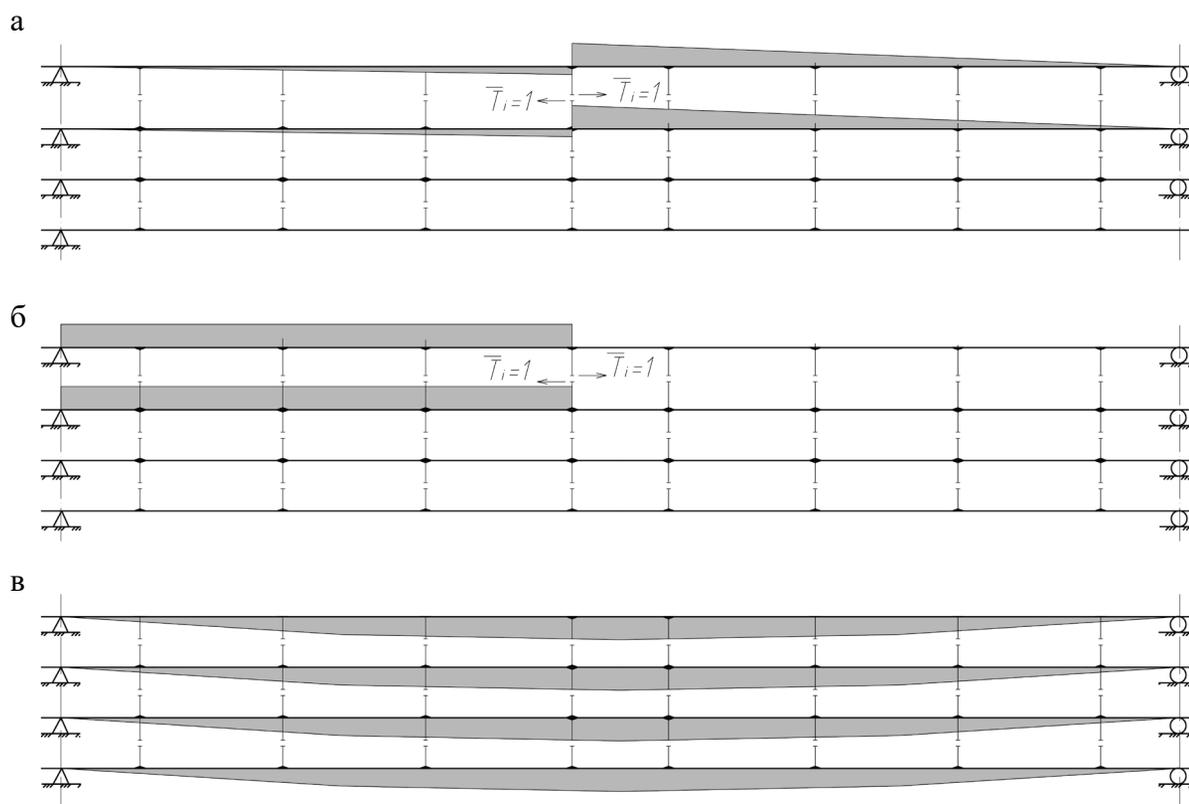


Рисунок 3 – Общий вид единичных эпюр  $\bar{M}_i$  и  $\bar{N}_i$  и эпюр  $M_0$  в основной системе:  
 а – единичные эпюры  $\bar{M}_i$ ;  
 б – единичные эпюры  $\bar{N}_i$ ; в – эпюры грузовых моментов

Figure 3 – General view of single diagrams  $\bar{M}_i$  and  $\bar{N}_i$  and diagrams  $M_0$  in the main system:  
 а – single epure  $\bar{M}_i$  s;  
 б – single epures  $\bar{N}_i$ ; с – load moment diagrams

Следуя сказанному, рассмотрены две системы канонических уравнений типа (1,2):

- с учетом деформаций от изгиба стержней

$$A^* \bar{T} + \bar{\Delta}_F + \bar{\Delta}_\Delta = 0, \quad (5)$$

с учетом растяжения (сжатия) и изгиба стержней

$$A^{**} \bar{T} + \bar{\Delta}_F + \bar{\Delta}_\Delta = 0, \quad (6)$$

где численные значения единичных коэффициентов матрицы  $A^*$  вычислены с учетом только деформаций изгиба, а численные значения единичных коэффициентов матрицы  $A^{**}$  – с учетом деформаций изгиба и сжатия (растяжения).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате решения систем уравнений (5) и (6) получены значения усилий сдвига  $T_r$ , вычисленные для системы с матрицей  $A^*$  и матрицей  $A^{**}$  (таблица).

Сравнение полученных значений усилий сдвига для систем уравнений 5 и 6 указывает на серьезное перераспределение, особенно концевых усилий в швах, напрямую связанных с мощностью, конструкцией и размещением концевых гребенчатых соединений между отдельными бревнами составного прогона.

Несомненный интерес представляет также характер распределения нормальных напряжений в сечениях отдельных стержней составной конструкции и особенно в области сосредоточенных связей сдвига.

Таблица  
Численные значения усилий сдвига, вычисленные для систем уравнений (5) и (6)

№ п/п.	Обозначения симметричных групп усилий $T_i$ с равными значениями	Численные значения усилий $T_i$ в кН	
		при $A^*$	при $A^{**}$
1	$T_1=T_8=T_{17}=T_{24}$	785	974
2	$T_2=T_7=T_{18}=T_{23}$	619	573
3	$T_3=T_6=T_{19}=T_{22}$	565	146
4	$T_4=T_5=T_{20}=T_{21}$	54	-126
5	$T_9=T_{16}$	13	0
6	$T_{10}=T_{15}$	4	-1
7	$T_{11}=T_{14}$	-34	2
8	$T_{12}=T_{13}$	4	4

После определения усилий в связях сдвига в основной системе без связей могут быть определены во всех сечениях составляющих стержней продольные силы и изгибающие моменты.

В итоге к изгибающему моменту отдельного стержня основной системы необходимо добавить сумму моментов от усилий сдвига, приложенных к данному стержню

$$M_i = M_i^0 + \sum_{i=1}^n M_i^T, \tag{7}$$

а при определении продольных сил следует учесть только сумму продольных сил от усилий сдвига

$$N_i = \sum_1^N N_i^T. \tag{8}$$

Полученные в результате расчета изгибающие моменты и продольные силы представлены в виде расчетных эпюр  $M$  и  $N$  на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, полученные графики изменения изгибающих моментов и продольных сил при вычислении перемещений по формуле Мора (3) отличаются только значениями усилий.

Скачкообразный характер изменения усилий связан с условно принятой расчетной схемой, в которой сдвиги передаются в виде сосредоточенных сил по центру соединительных элементов между отдельными стержнями. На самом деле принятые гребенчатые соединения растянуты по длине. Переход эпюры моментов, например из зоны с положительными

моментами в зону с отрицательными моментами, происходит плавно, без резких скачков. Очевидно, плавный переход от левых продольных сил к правым через посредство соединительных элементов и наоборот отличает реальную картину распределения их от скачкообразного на рисунке 4. В данном случае значения усилий слева и справа от условных заделок в основной системе характеризуют напряженное состояние стержней составного прогона с некоторым запасом.

Согласно рисунку 4 наиболее напряженными сечениями являются сечения, расположенные слева и справа от центров приложения сосредоточенных усилий сдвига  $T_i$  в месте перехода сосредоточенных моментов из растянутой зоны в сжатую зону. Срединные сечения ветвей, как правило, менее напряженные.

Проверка прочности и устойчивости сжато-изогнутых ветвей составной конструкции прогона при расчетной длине, не превышающей семикратную высоту элемента ветви [3], производится по формуле

$$\frac{N_d}{A_{nt}} + \frac{M_d}{\xi W_{nt}} \cdot \frac{R_{dt}}{R_{db}} \leq R_{ds}. \tag{9}$$

Распределение нормальных напряжений в характерных сечениях стержней составной конструкции рассматриваемого прогона показано на рисунке 5. При этом в обоих случаях максимальные значения нормальных напряжений во всех расчетных сечениях не превышают расчетных сопротивлений  $[R_{ds} = 15,7 \text{ МПа}]$ .

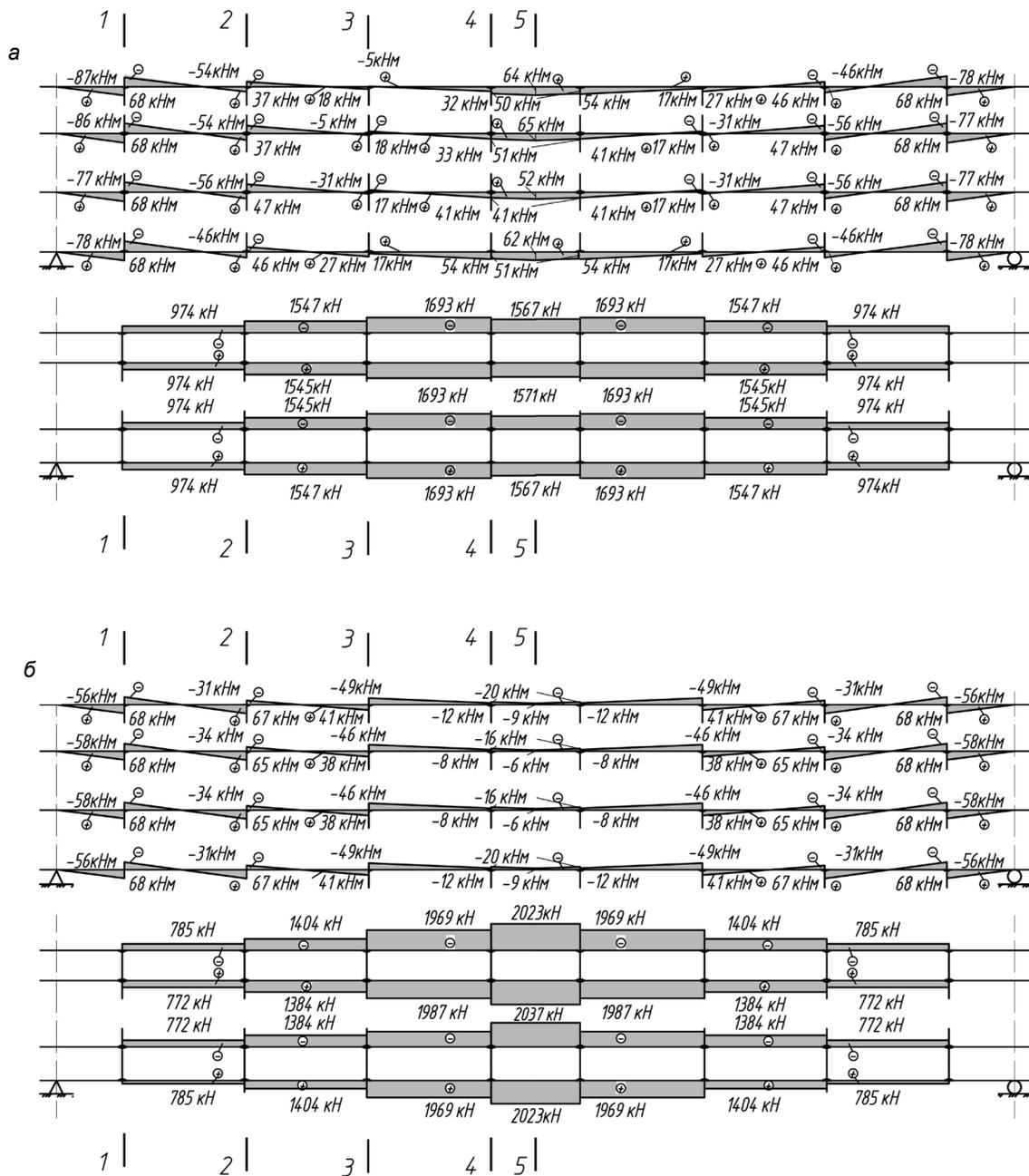


Рисунок 4 – Итоговые расчетные эпюры изгибающих моментов и продольных сил:  
 а – с учетом только деформаций изгиба стержней;  
 б – с совместным учетом деформаций растяжения (сжатия) и изгиба стержней

Figure 4 – Final calculated diagrams of bending moments and longitudinal forces:  
 а – taking into account only bending deformations;  
 б – taking into account tension (compression) and bending deformations

Другими словами, представленная конструкция не исчерпала своей несущей способности и может иметь более эффективные параметры сечений.

Вместе с тем точное определение единичных перемещений при совместном учете де-

формаций изгиба и растяжения-сжатия оказывает существенное влияние на значения сдвигающих усилий в приопорных зонах составного стержня (согласно таблицы разница между  $T_1^*$  и  $T_1^{**}$  составляет более 20%) и на конструкцию соединительных элементов.

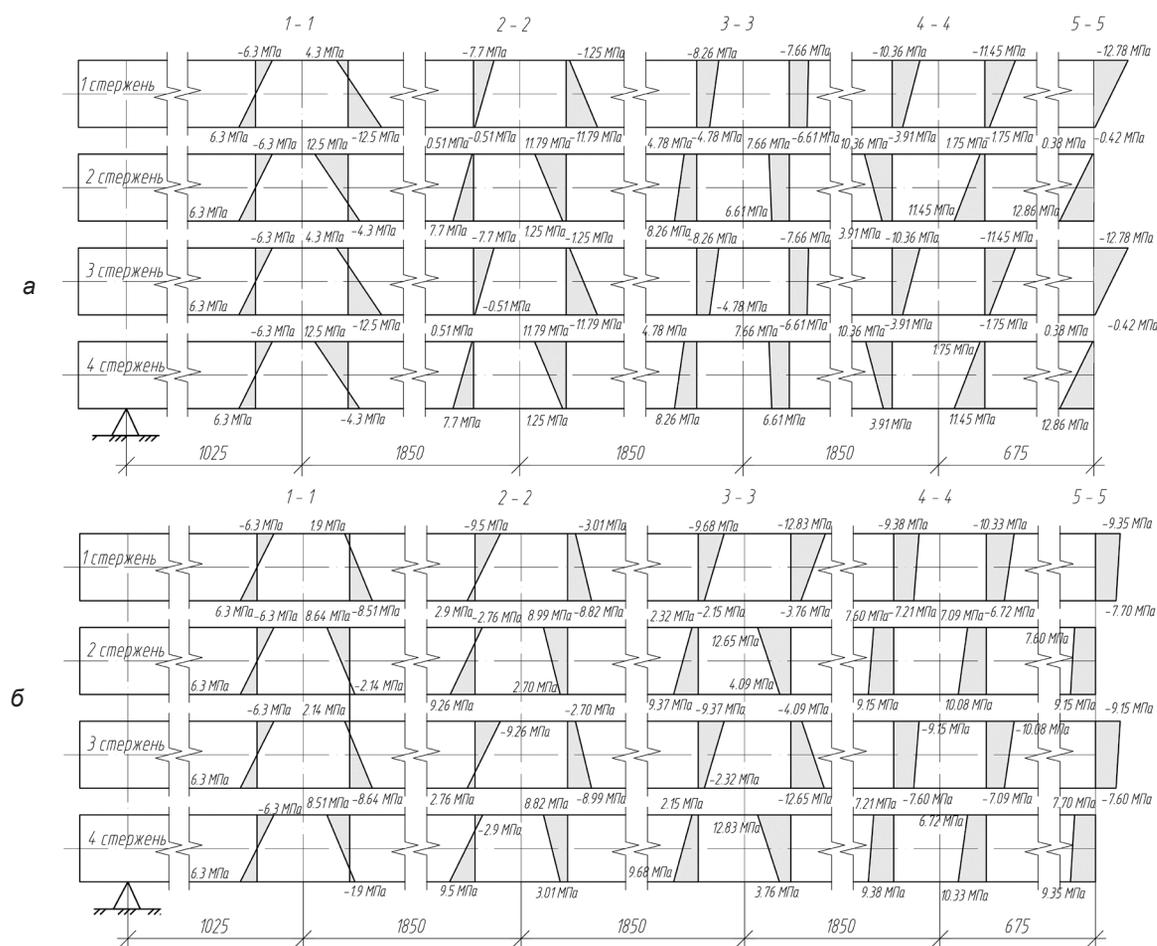


Рисунок 5 – Распределение нормальных напряжений в характерных сечениях стержней составной конструкции рассматриваемого прогона:  
 а – с учетом только деформаций от изгиба стержней;  
 б – с учетом деформаций растяжения (сжатия) и изгиба стержней

Figure 5 – Distribution of normal stresses in the characteristic sections of the composite structure of the girder:  
 а – taking into account only the bending deformations;  
 б – taking into account tension (compression) and bending deformations

О необходимости учета в расчетах составных прогонов деформаций изгиба и растяжения-сжатия свидетельствуют эпюры нормальных напряжений (рисунок 5, а), показывающие включение четырех независимо работающих на изгиб стержней (бревен) в сечении 1-1 в совместную работу на изгиб в сечении 5-5 попарно. Характер распределения нормальных напряжений без учета в расчетах влияния деформаций растяжения-сжатия не отражает совместную работу стержней на изгиб (рисунок 5, б).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой повышения несущей способности конструкций из бревен является обеспечение совместной работы составляющих конструкцию составного прогона бревен.

Применение бревенчатых прогонов в современных балочных мостах с пролетами более 7 м требует разработки специальных соединительных устройств. При этом соединение бревен по длине может быть выполнено посредством болтов и стальных накладок.

В качестве соединительных элементов для

совместной работы бревен по высоте предложены гребенчатые соединения в виде системы глухих цилиндрических нагелей, защемленных в стальных пластинах.

Предложенный метод соединений позволяет перекрывать пролеты длиной 12–15 м из древесины вместо железобетонных конструкций.

В настоящей статье доказана необходимость обязательного учета в расчетах составных прогонов из бревен продольных деформаций, существенно влияющих на мощность и распределение соединительных элементов на сдвиг, а последних – на обеспечение совместной работы бревен.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стуков В.П. ДЕРЕВОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛОЧНЫЕ МОСТЫ: состояние, теория, исследования, проектирование: монография. Министерство образования и науки Российской Федерации «Северный (Арктический) федеральный ун-т им. М.В. Ломоносова», 2014. 315 с.
2. Уткин В.А., Кобзев П.Н. Автодорожные деревянные мосты нового поколения: монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2004. 56 с.
3. Уткин В.А., Пузиков В.И., Шишова Т.А. О применении древесины для строительства мостов нового поколения в Омской области // Строительные материалы. 2006. №1. С.28-30.
4. Уткин В.А., Пузиков В.И., Кобзев П.Н. Опыт внедрения новых дощато-гвоздевых пролетных строений в дорожном строительстве Омской области // Дороги и мосты: сборник. ФГГУП, «РосдорНИИ». М., 2008. Вып. 19/1. С.162-171.
5. Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.В., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов // Сборник «Дороги и мосты». 2014. Выпуск 32/2. С. 127–142.
6. Уткин В.А., Синиговская Н.В. Исследование несущей способности составных прогонов с соединениями на глухих цилиндрических нагелях, защемленных в стальных пластинах // Вестник СибАДИ. Омск, СибАДИ. 2016. 5 (51). С. 134–145.
7. Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г. Разработка и совершенствование балочных пролетных строений на основе составных прогонов из бревен // Вестник СибАДИ. 2018. Том 15, № 5. С. 760–773.
8. Рожко П.П., Кулиш В.И. Исследование несущей способности стальных нагелей в деревобетонных мостах // Труды ХабПИ. 1966. Выпуск 3. С. 21–26.
9. Кулиш В.И. Исследование работы и расчет на прочность деревожелезобетонных балок // В сб. «Строительство железных дорог и эксплуатация пути». Хабаровск, ХабИИЖТ, 1967. С. 120–127.
10. Шумахер А.В. Экспериментальное исследование жесткости нагельных связей, объединенных деревобетонных балок под действием многократно-повторной нагрузки // Сборник научных трудов. Омск, Западно-сибирское издательство. 1970. № 2. С. 30–43.
11. Haakana P., Jutila A., Rautakorpi H., Salokangas L. Research project development of wood bridges, survey of source document. Excerpt of the Finnish Report Survey of background information. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1993. no. 2. p. 46.
12. Wiio M., Jutila A., Makipuro R., Salokangas L., Wistbaka J. Research project development of wood bridges, literature survey of shear connections of wood-concret composite bridges. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1994. no. 7. p. 14.
13. Makipuro R., Jutila A., Rautakorpi H., Salokangas L. Research project development of wood bridges, experimental studies of wood-concret shear connections. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1994. no. 11. p. 26.
14. Смирнов П.Н. Сравнение методик расчета нагельных соединений деревянных конструкций. Отечественный и зарубежный опыт // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. №6. С. 68–72.
15. Смирнов П.Н. Особенности работы нагельных соединений со стальными накладками и прокладками. Методика расчета // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. №2. С. 19–25.
16. Никитин Г.В. К вопросу о влиянии жесткости узлов в пространственных стержневых системах // Сб. научн. тр. Ленингр. Ин-т инженеров коммуна. хоз-ва. Л., 1936. Вып. 3. С.58-62.
17. Дмитриев П.А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях при кратковременном и длительном действии нагрузки // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1965. № 12. С. 165–173.
18. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно - регулярной структурой: монография. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 276 с.
19. Лабудин Б.В. Расчет пространственных конструкций с учетом деформативной податливости связей (развитие идей П.А. Дмитриева, В.М. Коченова, В.А Лебедева, Г.В. Никитина и др.) // Известия вузов Строительство. №11-12/2013. С. 1-12.
20. Ржаницин А.Р. Работа связей в составных стержнях // Текст. Научн. тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1938, №2. С. 29-32.

### REFERENCES

1. Stukov V.P. *Derevozhelezobetonnye balochnye mosty: sostojanie, teorija, issledovanija, proektirovanie: monografija* [Wood concrete beam bridges: condition, theory, research, design: monograph]. 2014: 315. (in Russian)
2. Utkin V.A., Kobzev P.N. *Avtodorozhnye derevjannye mosty novogo pokolenija: monografija*. [Road wooden bridges of the new generation: monograph.]. Омск: Izd-vo SibADI, 2004: 56. (in Russian)
3. Utkin V.A., Puzikov V.I., Shishova T.A. O primenении drevesiny dlja stroitel'stva mostov novogo

pokolenija v Omskoj oblasti [On the Use of Wood for the Construction of New Generation Bridges in the Omsk Region]. *Stroitel'nye materialy*. 2006; 1: 28-30. (in Russian)

4. Utkin V.A., Puzikov V. I., Kobzev P.N. Opyt vnedrenija novyh doschato-gvozdevykh proletnykh stroenij v dorozhnom stroitel'stve Omskoj oblasti [Experience of introduction of new additional-nail overflights in road construction of Omsk region]. *Dorogi i mosty: sbornik*. 2008; 19/1: 162-171. (in Russian)

5. Utkin V.A., Puzikov V.I., Kazantsev B.V., Karetnikov M.Ju. O primenenii drevesiny dlja stroitel'stva mostov [On the use of wood for bridge construction]. *Dorogi i mosty*. 2014; 32/2: 127-142. (in Russian)

6. Utkin V.A., Sinigovskaja N.V. Issledovanie nesuschej sposobnosti sostavnykh progonov s soedinenijami na gluhih tsilindricheskikh nageljah, zaschemlennykh v stal'nykh plastinah [Research of bearing capacity of composite girders with connections to the deaf cylindrical pins, clamped in steel plates]. *Vestnik SibADI*. 2016; 5(51): 134-145. (in Russian)

7. Utkin V.A., Kobzev P.N., Shatunova E.G. Development and improvement of beam structures on the basis of composite logs' girders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(5):760-773. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-760-773>

8. Rozhko P.P., Kulish V.I. Issledovanie nesuschej sposobnosti stal'nykh nagelej v derevobetonnykh mostah [Study of the bearing capacity of the steel pins in bridges]. *Trudy HabPI*. 1966; 3: 21-26. (in Russian)

9. Kulish V.I. Issledovanie raboty i raschet na prochnost' derevozhelezobetonnykh balok [Study of work and strength calculation of wood-concrete beams]. *Stroitel'stvo zheleznykh dorog i `ekspluatatsija puti*. Habarovsk, HablIzhT, 1967: 120-127. (in Russian)

10. Shumaker A.V. `Eksperimental'noe issledovanie zhestkosti nagel'nykh svjazej, ob`edinennykh derevobetonnykh balok pod dejstviem mnogokratno-povtornoj nagruzki [Experimental study of the stiffness of the bolted connections of the combined wood-concrete beams under the influence of a multiple-repeated load]. *Sbornik nauchnykh trudov*. Omsk, Zapadno-sibirskoe izdatel'stvo. 1970; 2: 30-43. (in Russian)

11. Naakana P., Jutila A., Rautakorpi H., Salokangas L. Research project development of wood bridges, survey of source document. Exept of the Finnish Report Survey of background information. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1993; 2: 46.

12. Wiio M., Jutila A., Makipuro R., Salokangas L., Wistbaka J. Research project development of wood bridges, literature survey of shear connections of wood-concret composite bridges. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1994; 7: 14.

13. Makipuro R., Jutila A., Rautakorpi H., Salokangas L. Research project development of wood bridges, experimental studies of wood-concret shear connections. Helsinki University of Technology, Laboratory of bridge Engineering. 1994; 11: 26.

14. Smirnov P.N. Sravnenie metodik rascheta nagel'nykh soedinenij derevjannykh konstruksij. Ote-chestvennyj i zarubezhnyj opyt [Comparison of methods of calculation dowel joints of wooden structures. Domestic and foreign experience]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2013; 6: 68-72. (in Russian)

15. Smirnov P.N. Osobennosti raboty nagel'nykh soedinenij so stal'nymi nakladkami i proklad-kami. Metodika rascheta [Features the work of pin joints with steel plates and gaskets. Method of calculation]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2015; 2: 19-25. (in Russian)

16. Nikitin G.V. K voprosu o vlijanii zhestkosti uzlov v prostranstvennykh sterzhnevnykh sistemah [To the question of the influence of the stiffness of nodes in spatial rod systems]. *Sbornik nauchnykh trudov*. 1936; 3: 58-62. (in Russian)

17. Dmitriev P.A. Issledovanie prochnosti drevesiny na smjatje v otverstii pri kratkovremennom i dlitel'nom dejstvii nagruzki [Study of the strength of the wood to crumple in the hole at short-term and long-term load]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*. 1965;12:165-173. (in Russian)

18. Labudin B.V. *Sovershenstvovanie kleenykh derevjannykh konstruksij s prostranstvenno-reguljarnoj strukturoj* [Improvement of glued wooden structures with spatial and regulatory structure: monograph.]. Arhangel'sk: Izd-vo AGTU, 2007: 276. (in Russian)

19. Labudin B.V. Raschet prostranstvennykh konstruksij s uchetom deformativnoj podatlivosti svja-zej (razvitie idej P.A. Dmitrieva, V.M. Kochenova, V.A. Lebedeva, G.V. Nikitina i dr.) [Calculation of spatial structures taking into account the deformative compliance of Svya-zei (development of ideas of P.A. Dmitry, V.M. Kochenova, V.A. Lebedev, G.V. Nikitin, etc.)]. *Izvestija vuzov Stroitel'stvo*. 2013; 11-12/2013:1-12. (in Russian)

20. Rzhantsin A.R. Rabota svjazej v sostavnykh sterzhnjah [Link work in composite rods]. *Tekst. Nauchn. tr. MISI im. V.V. Kujbysheva*. 1938; 2: 29-32. (in Russian)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Уткин Владимир Александрович – Формулирование цели, метод исследования, алгоритм расчета.

Кобзев Павел Николаевич – Анализ источников, редактирование статьи.

Шатунова Елена Геннадьевна – Расчет составных прогонов длиной 15 м. Оформление статьи.

## AUTHORS' CONTRIBUTION

Vladimir A. Utkin – aim formulation; research method; calculation algorithm.

Pavel N. Kobzev – source analysis; manuscript editing.

Elena G. Shatunova – calculation of composite girder with a length of 15 m; manuscript structure.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

Уткин Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Мосты и тоннели» ФГБОУ ВО «СибАДИ», ORCID ID 0000-0002-2044-3242 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: prof.utkin@mail.ru\*).

Кобзев ID Павел Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Мосты и тоннели» ФГБОУ ВО «СибАДИ», ORCID ID 0000-0003-0947-6227 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kpn\_omsk@mail.ru).

Шатунова Елена Геннадьевна – магистрант, ИМА, SM17-MA8 ФГБОУ ВО «СибАДИ», ORCID ID 0000-0001-9129-7898 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lena.25.95@mail.ru).

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Vladimir A. Utkin – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID ID 0000-0002-2044-3242 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: prof.utkin@mail.ru\*).

Pavel N. Kobzev – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID ID 0000-0003-0947-6227 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: kpn\_omsk@mail.ru).

Elena G. Shatunova – Master, IMA, SM17-MA8, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID ID 0000-0001- 9129-7898 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: lena.25.95@mail.ru).

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

**1 УДК.** На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

**2. Заглавие статьи.** Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

**3. Фамилии авторов.** Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

**4. Аннотация.** Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала [vestnik.sibadi.org](http://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](http://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](http://vestnik.sibadi.org).

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала [vestnik.sibadi.org](http://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](http://vestnik.sibadi.org).

#### **9. Библиографический список (References)**

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

**Аффилиация.** Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

#### **Технические требования к оформлению.**

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной 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. Корректур статей авторам не высылаются, 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.