

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



научный рецензируемый журнал

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

**СИБАДИ** •

“Vestnik SibADI”

Том 19, № 1. 2022

Vol. 19, No. 1. 2022

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

# **ВЕСТНИК СИБАДИ**

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

**DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-1**

**ТОМ 19, № 1. 2022**

**VOL. 19, No. 1. 2022**

**Сквозной номер выпуска – 83**

**Continuous issue – 83**

**Учредитель и издатель:**

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

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

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

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

Издается с 2004 года

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

**Founder and Publisher:**

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

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

**EDITORIAL POSTAL ADDRESS**

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

Published since 2004  
by 6 issues per year

Subscription index is 66000  
in the Rospechat Agency's catalog

[www.vestnik.sibadi.org](http://www.vestnik.sibadi.org)  
e-mail: [vestniksibadi@yandex.ru](mailto:vestniksibadi@yandex.ru)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2022

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

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

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

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

05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),

05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),

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

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

Этот журнал предоставляет непосредственный открытый доступ к своему контенту исходя из следующего принципа: свободный открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями. Политика открытого доступа соответствует определению Будапештской инициативы открытого доступа (BOAI) и означает, что статьи доступны в открытом доступе в сети Интернет, что позволяет всем пользователям читать, загружать, копировать, распространять, распечатывать, искать или ссылаться на полные тексты этих статей, сканировать их для индексации, передавать в качестве данных для программного обеспечения или использовать их для любых других законных целей без финансовых, юридических или технических барьеров, за исключением тех, которые неотделимы от получения доступа к самому Интернету. Для получения дополнительной информации обратитесь к Будапештской декларации (<https://www.budapestopenaccessinitiative.org/>).

**Журнал индексируется и архивируется:**

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка».

**Журнал является членом:**

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

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 25.02.2022. Дата выхода в свет 28.02.2022. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия  
Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

Исключительное право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, право авторства на статьи – авторам.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2022

*“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.*

This journal provides direct open access to its content based on the following principle: free open access to research results enhances global knowledge sharing.

The Open Access Policy meets the definition of the Budapest Open Access Initiative (BOAI) and means that articles are available for public access on the Internet, allowing all users to read, download, copy, distribute, print, search or link to the full text of these articles, scan them for indexing, transmit them as data for software or use them for any other lawful purpose without financial, legal or technical barriers, except those that are inseparable from access to the Internet itself. For more information please refer to the Budapest Declaration (<https://www.budapestopenaccessinitiative.org/>).

**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 25.02.2022. Publication date is 28.02.2022. Format is 60 × 84 1/8.

Headset is Arial, operational printing, offset paper, 27,25 conditionally printed sheets, 500 copies. Free of charge. Printed at the Printing and Publishing Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia

Content is available under license CC BY.

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

The sole right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors.

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2022

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

### *Транспортное, горное и строительное машиностроение*

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

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

### *Транспорт*

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

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

### *Строительство и архитектура*

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## EDITORIAL TEAM

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

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

### *Transport, mining and mechanical engineering*

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

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

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

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

### *Transport*

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

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

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

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

### *Construction and architecture*

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

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

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

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

## EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Scopus Author ID** 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

**Scopus Author ID** 7006776195

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

**Scopus Author ID** 6506823308

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

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

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

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

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

**ORCID ID** 0000-0001-8494-2852

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*В.А. Николаев*

**АНАЛИЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА ДИСКАМИ ..... 12**

*Д.С. Алешков, М.В. Суковин*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ  
ТРАНСПОРТИРОВАНИИ СНЕЖНОЙ МАССЫ ..... 24**

*С.Д. Иванов, А.Н. Назаров*

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА МЕХАНИЗМ ПОДЪЕМА КРАНОВ  
МОСТОВОГО ТИПА..... 36**

*Р.Ю. Сухарев*

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО  
АВТОГРЕЙДЕРА ..... 48**

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

*И.Е. Агуреев, Г.Е. Пышная, В.А. Пышный*

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО СПРОСА ЦЕНТРОВ  
МАССОВОГО ТЯГОТЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ  
В РАМКАХ ТЕОРИИ МАКРОСИСТЕМ..... 62**

*Л.С. Трофимова, А.П. Жигadlo*

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИМ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА РАБОТНИКОВ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА . 74**

*С.В. Пашукевич*

**КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ  
ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ..... 84**

## РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина, А.М. Гридчин*

**ВОДО- И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО  
АСФАЛЬТОБЕТОНА, ПРИГОТОВЛЕННОГО НА БИТУМЕ,  
МОДИФИЦИРОВАННОМ СЭВИЛЕНОМ..... 102**

*А.С. Пролыгин, А.Л. Калинин, А.С. Александров, Н.П. Александрова*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ШТАМПОВЫХ  
МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ .....114**

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

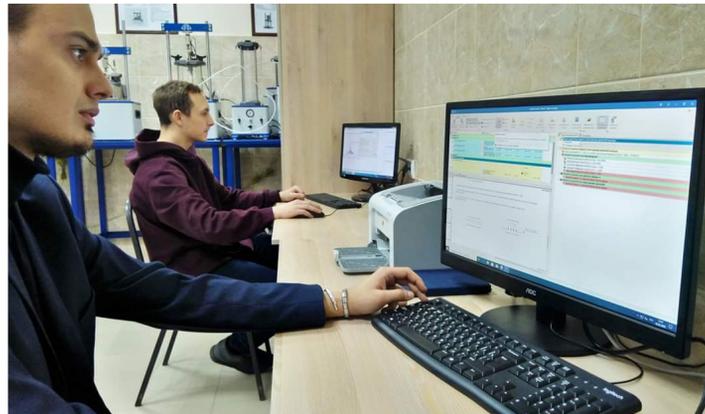
<i>Vladimir A. Nikolayev</i> <b>ENERGY COSTS FOR CUTTING SOIL WITH DISKS ANALYSIS</b> .....	13
<i>Denis S. Aleshkov, Mikhail V. Sukovin</i> <b>MATHEMATICAL MODEL FOR VERTICAL MILLER OPERATION WHEN SNOW MASS TRANSPORTATION</b> .....	25
<i>Sergey D. Ivanov, Alexander N. Nazarov</i> <b>DRIVE ELECTRICAL PARAMETERS APPLICABILITY EVALUATION TO DETERMINE LOADS ON BRIDGE CRANE LIFTING MECHANISM</b> .....	37
<i>Roman Yu. Sukharev</i> <b>METHODS OF CONTROLLING THE COURSE FOR AN SELF-DRIVING GRADER</b> .....	49

## **PART II. TRANSPORT**

<i>Igor E. Agureev, Galina E. Pyshnaya, Vladislav A. Pyshnyi</i> <b>METHODOLOGY TO DETERMINE THE PROBABILISTIC DEMAND OF MASS ATTRACTION CENTERS BASED ON THE CLASSIFICATION WITHIN THE FRAMEWORK OF MACROSYSTEMS THEORY</b> .....	63
<i>Liudmila S. Trofimova, Aleksandr P. Zhigadlo</i> <b>ACTIVITIES FOR ROAD TRANSPORT ENTERPRISES ON INDICATORS OF WORKERS AND ROLLING STOCK PRODUCTIVITY PLANNING</b> .....	75
<i>Sofia V. Pashukevich</i> <b>CLASSIFICATION OF CONTAMINANTS IN DIESEL ENGINE OILS</b> .....	85

## **PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Valentina V. Yadykina, Svetlana N. Navolokina, Anatoly M. Gridchin</i> <b>WATER- AND FROST-RESISTANCE OF CRUSHED STONE MASTIC ASPHALT CONCRETE PREPARED ON SEVILEN-MODIFIED BITUMEN</b> .....	103
<i>Aleksandr L. Kalinin, Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov, Natalia P. Aleksandrova</i> <b>COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING STAMP MODULES OF SOIL DEFORMATION</b> .....	115



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



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

УДК 625.08

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

## АНАЛИЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА ДИСКАМИ

**В.А. Николаев**

Ярославский государственный технический университет,  
г. Ярославль, Россия  
[Nikolaev53@inbox.ru](mailto:Nikolaev53@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-7503-6612>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При проектировании агрегата для формирования подстилающего слоя возникла проблема выбора рабочих органов, предназначенных для предварительного рыхления поверхностного слоя грунта, насыщенного корнями растений, с целью последующего обнажения подстилающего слоя строящейся автомобильной дороги. При выборе рабочих органов технических средств следует учитывать многие факторы. Однако решающим показателем являются затраты энергии на единицу объема обрабатываемого материала. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены, но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить затраты энергии на единицу объема разрабатываемого грунта. Варианты определения действующих сил и затрат энергии на резание грунта дисками, изложенные различными авторами, предполагают решение весьма громоздких зависимостей. Они основаны на синтезном подходе к решению проблемы. Не отвергая синтезный подход, сделан анализ взаимодействия дисков с грунтом. Вычисление затрат энергии дискового рыхлителя осуществлено на основе выявленных ранее значений его геометрических, кинематических и динамических параметров.

**Методика исследования.** На основе конструктивной компоновки дискового рыхлителя определено расстояние и время перемещения дискового рыхлителя для разработки грунта объемом один кубический метр. Для анализа диск разделён на элементы: кромку лезвия, фаску лезвия и боковые поверхности диска. Разработана методика определения затрат энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Разработана схема условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт для определения условной нормальной реакции фаски лезвия диска и схема сил для определения нормальной реакции боковой поверхности диска на воздействие грунта. Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно определить только путём экспериментов.

**Результаты.** На основе разработанной методики определены затраты энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Из схемы условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт определена условная нормальная реакция фаски лезвия диска. Из другой схемы сил выявлена нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта. Суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками получены путём сложения выявленных частных затрат энергии.

**Заключение.** На основании проведённых теоретических исследований вычислены объёмные затраты энергии на резание грунта дисками. К ним необходимо добавить затраты энергии: на резание корней кромками лезвий дисков и на перемещение дискового рыхлителя. В структуре известных затрат энергии преобладает энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Так как затраты энергии на резание грунта дисками весьма велики, в агрегате для формирования подстилающего слоя их применение нецелесообразно. Это не исключает применение дисковых рыхлителей для других целей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, диск, дисковый рыхлитель, резание, анализ, силы, затраты энергии

Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 24.12.2021; принята к публикации 28.02.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ затрат энергии на резание грунта дисками // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

© Николаев В.А., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>  
Original article

## ENERGY COSTS FOR CUTTING SOIL WITH DISKS ANALYSIS

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,  
Yaroslavl, Russia  
[nikolaev53@inbox.ru](mailto:nikolaev53@inbox.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** When designing a unit for the formation of the underlying layer, the problem arose of choosing working bodies designed for preliminary loosening of the surface layer of soil saturated with plant roots, with the aim of subsequent exposure of the underlying layer of the road under construction. When choosing the working bodies of technical means, many factors should be taken into account. However, the decisive indicator is the energy consumption per unit volume of the material being processed. Although the theoretical foundations of cutting soil are considered in great detail, but based on them it is difficult to identify and compare energy costs per unit volume of the developed soil. Options for determining the active forces and energy costs for cutting soil with disks, outlined by various authors, suggest the solution of very cumbersome dependencies. They are based on a synthesis approach to solving the problem. Without rejecting the synthesis approach, an analysis of the interaction of disks with the soil is made. Calculation of energy costs of disk ripper is carried out on the basis of previously identified values of its geometric, kinematic and dynamic parameters.

**The method of research.** Based on the structural layout of the disc ripper, the distance and time of movement of the disc ripper for the development of soil with a volume of one cubic meter was determined. For analysis, the disc is divided into elements: the edge of the blade, the chamfer of the blade and the side surfaces of the disc. A method for determining energy costs has been developed: for separating the soil layer from its array, dividing the layer into fragments, overcoming the soil pressure on the chamfer of the disk, accelerating the soil with a chamfer of the disc blade, overcoming friction between the soil and the chamfer of the disc blade, overcoming friction between the soil and the side surface of the disk. A scheme of conditional forces of influence of a chamfer of a blade of a disk on a ground for determination of conditional normal reaction of a chamfer of a blade of a disk and scheme of forces from determination of normal reaction of a lateral surface of a disk on influence of a ground is developed. The energy costs of cutting the roots with the edge of the blade of the disc can only be determined by experiments.

**Results.** On the basis of the developed methodology, energy costs have been determined: for separating the soil layer from its array, dividing the layer into fragments, overcoming the ground pressure on the chamfer of the disk, accelerating the soil with the chamfer of the blade of the disk, overcoming friction between the soil and the chamfer of the blade of the disk, overcoming friction between the soil and the side surface of the disk. From the scheme of the conditional forces of the impact of the chamfer of the blade of the disk on the ground, the conditional normal reaction of the chamfer of the blade of the disc is determined. From another scheme of forces, the normal reaction of the lateral surface of the disc to the effects of the soil was revealed. The total volumetric energy costs for cutting soil with disks are obtained by adding the identified partial energy costs.

**Conclusion.** On the basis of the theoretical studies carried out, the volumetric energy costs for cutting the soil with disks have been calculated. To these it is necessary to add energy costs: for cutting the roots with the edges of the blades of the disks and for moving the disc ripper. The structure of known energy expenditure is dominated by the energy to overcome friction between the soil and the side surface of the disk. Since the energy costs for cutting soil with disks are very high, it is impractical to use them in the unit for the formation of the underlying layer. This does not exclude the use of disc rippers for other purposes.

**KEYWORDS.** Soil, disc, disc ripper, cutting, analysis, strength, energy expenditure

The article was submitted 21.11.2021; approved after reviewing 24.12.2021; accepted for publication 28.02.2022.

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: Nikolayev V.A. Energy costs for cutting soil with disks analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

© Nikolayev V.A., 2022



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

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:**

1) на основе конструктивной компоновки дискового рыхлителя определено расстояние и время перемещения дискового рыхлителя для разработки грунта объёмом один кубический метр;

2) разработана методика определения затрат энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска;

3) приведён пример расчёта этих частных затрат энергии на разработку грунта объёмом один кубический метр;

4) вычислены суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками.

**ВВЕДЕНИЕ**

При проектировании агрегата для формирования подстилающего слоя (патент РФ №2689007) [1, 2, 3] возникла проблема выбора рабочих органов, предназначенных для предварительного рыхления поверхностного слоя грунта, насыщенного корнями растений, с целью последующего обнажения подстилающего слоя строящейся автомобильной дороги. Необходимо было рассмотреть вариант использования для этой цели пассивных дисков.

При выборе рабочих органов технических средств следует учитывать многие факторы. Однако решающим показателем являются затраты энергии на единицу объёма обрабатываемого материала. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены в работах<sup>1,2,3</sup>[4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить затраты энергии на единицу объёма разрабатываемого грунта. Варианты определения действующих сил и затрат энергии на резание грунта дисками, изложенные различными авторами, предполагают решение весьма громоздких зависимостей. Они основаны на синтезном подходе

к решению проблемы. Не отвергая синтезный подход, сделаем анализ взаимодействия дисков с грунтом. Для предварительного резания грунта целесообразно использовать дисковый рыхлитель, агрегируемый с энергетическим устройством. Вычисление затрат энергии дискового рыхлителя будем осуществлять на основе выявленных ранее значений его геометрических, кинематических и динамических параметров [1].

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

При движении дискового рыхлителя [1] передний диск осуществляет зажатое резание грунта. Остальные диски осуществляют полужазаемое резание, так как режут и смещают последовательно грунт в пространство, созданное ранее прошедшим диском. Затраты энергии на разработку грунта передним диском, осуществляющим зажатое резание, равны сумме затрат энергии:

- на резание грунта лезвием диска;
- уплотнение грунта фасками лезвия;
- преодоление трения между грунтом и фасками лезвия;
- преодоление трения между грунтом и боковыми поверхностями диска.

Выполнение анализа затрат энергии на разработку грунта передним диском было бы весьма приблизительным, поскольку вычленив каждую составляющую затрат энергии даже теоретически сложно. Поэтому определим затраты энергии на резание грунта передним диском, используя результаты предыдущих расчётов [1]. Были выявлены: горизонтальная составляющая  $R_{э\text{пер}}$  сопротивления перемещению переднего диска, погружённого в грунт на глубину  $a$ , скорость агрегата  $v_d$ , время  $\tau_{d,p}$  разработки одного кубического метра грунта агрегатом в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя. Потребляемая мощность на резание грунта передним диском

$$N_{\text{общ пер}} = R_{э\text{пер}} v_d. \quad (1)$$

Общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр передним диском

<sup>1</sup> Курилов Е. В., Трошин Д. И. Косое резание грунта дисковым ножом: опыт проектирования и эксплуатации экскаваторных ковшей с подвижными боковыми стенками. Ярославль: ЯГТУ. 2017. 127 с.

<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.

$$u_{\text{общ пер}} = N_{\text{общ пер}} \tau_{\partial p} \quad (2)$$

Остальные диски осуществляют полузажатое резание грунта. Допустим, не многодисковый рыхлитель разрабатывает грунт, а один условный диск осуществляет полузажатое резание грунта шириной захвата  $b' = 0,012 \text{ м}$ . Тогда для разработки одного кубического метра грунта  $V_1$  диск должен переместиться на расстояние

$$s_{\partial} = \frac{V_1}{a \cdot b'} \quad (3)$$

Время перемещения

$$\tau_{\partial} = \frac{s_{\partial}}{v_{\partial}} \quad (4)$$

Для анализа разделим диск на элементы: кромку лезвия, фаску лезвия и боковые поверхности диска. Затраты энергии на разработку грунта острым диском, осуществляющим полузажатое резание, равны сумме затрат энергии:

- на отделение пласта грунта от его массива;
- резание корней лезвием диска;
- разделение пласта на фрагменты;
- преодоление напора грунта на фаску диска;
- ускорение грунта фаской лезвия диска;
- преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска;
- преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска.

Во-первых, сложность анализа заключена в армированности верхнего слоя грунта корнями растений. Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно определить только путём экспериментов, поэтому при теоретическом анализе допустим, что грунт не армирован корнями растений. Во-вторых, угловая скорость вращения диска является весьма приближительной. Чтобы провести теоретический анализ затрат энергии на резание грунта диском, допустим, что диск не вращается. При этом трансформацию угла заточки лезвия не учитываем. Угол  $i$  заточки диска не должен превышать угол трения между грунтом и сталью, который около  $26^\circ$ . Допустим, угол заточки диска  $25^\circ$ .

*Затраты энергии, необходимые для отделения пласта грунта от его массива*

Ширина отрыва пласта от массива грунта равна глубине разработки грунта  $a$ . Отделение пласта от массива грунта происходит микроотрывами. Заменяем дискретный отрыв

элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке  $1 \text{ м}^3$  грунта. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна  $s_{\partial}$ . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия диска

$$S_{\text{отр } \partial} = a \cdot s_{\partial} \quad (5)$$

Поскольку условно заменили дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке  $1 \text{ м}^3$  грунта, то и силу, необходимую для единовременного отделения пласта объёмом один кубический метр, назовём условной силой.

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение  $\sigma_p^e$ . Общая условная сила воздействия передней кромки лезвия одного условного ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{\Sigma \text{ отд д}} = \sigma_p^e \cdot S_{\text{отр } \partial} \quad (6)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве  $h_{\text{отр}}$ . Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{\text{отр } \partial} = F_{\Sigma \text{ отр } \partial} h_{\text{отр}} \quad (7)$$

*Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты*

После отделения от массива грунта пласт падает на фаску лезвия диска, которая, изгибая пласт, разделяет его на фрагменты. Пласт разделяется на фрагменты не по плоскостям, а по поликриволинейным поверхностям. Чтобы отразить увеличение затрат энергии в результате разделения пласта по поликриволинейным поверхностям, примем коэффициент  $k_{yп}$ , учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с плоскостью и наличие трещин-ответвлений. Он зависит от свойств грунта и толщины отделяемого пласта: чем больше толщина пласта, тем больше следует принимать в теоретических расчётах коэффициент  $k_{yп}$ . В теоретических расчётах среднее расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты, можно принять равным пути агрегата, на котором произойдёт один микроотрыв,  $l_{\text{отр}}$ . Площадь отделения одного фрагмента от

другого определим как произведение коэффициента  $k_{yп}$ , глубины разработки грунта  $a$  и ширины срезаемого диском слоя грунта  $b'$ :

$$S_{фр} = k_{yп}ab'. \quad (8)$$

Количество разрывов пласта от воздействия диска на расстоянии общей длины отрыва пласта от массива грунта объемом один кубический метр

$$n_{пл\delta} = \frac{s_{\delta}}{l_{отр}}. \quad (9)$$

Суммарная площадь разрывов пласта

$$S_{\Sigma фр} = S_{фр}n_{пл\delta}. \quad (10)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты,

$$F_{\Sigma фр} = \sigma_p^g S_{\Sigma фр}. \quad (11)$$

Примем величину перемещения отделяемого фрагмента грунта  $h_{отр}$ . Энергия, необходимая для разделения пласта на фрагменты, при разработке грунта объемом один кубический метр,

$$u_{фр} = F_{\Sigma фр}h_{отр}. \quad (12)$$

*Затраты энергии на преодоление напора грунта на фаску диска*

На основании относительности движения допустим, что не диск преодолевает сопротивление грунта, а отрезанный пласт грунта набегаёт на фаску лезвия диска со скоростью  $v_{\delta}$ . Заменим постепенное воздействие грунта на фаску лезвия диска одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Мгновенная сила  $F_{e-\delta}$  набегающего грунта равна силе его инерции:

$$F_{e-\delta} = jm_{e-\delta} = \rho \frac{V_{e-\delta}}{\tau_{e-\delta}} (v_{\delta} - v_{кон}),$$

где  $m_{e-\delta}$  – масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду;  $v_{кон}$  – конечная скорость набегающего грунта. Так как глубина разработки грунта  $a$ , ширина срезаемого диском слоя грунта  $b'$ , объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску диска в секунду,

$$\frac{V_{e-\delta}}{\tau_{e-\delta}} = a_{\delta}b'v_{\delta}. \quad (13)$$

Допустим, плотность грунта  $\rho$ . Масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду,

$$m_{e-\delta} = \rho \cdot \frac{V_{e-\delta}}{\tau_{e-\delta}}. \quad (14)$$

Допустим, конечная скорость набегающего грунта  $v_{кон} = 0$ . Казалось бы, конечная скорость набегающего грунта не должна быть равна нулю, так как диск вращается. Однако, во-первых, было принято допущение, что диск неподвижен. Во-вторых, используем диск гладкий, без вырезов и выступов, поэтому для набегающего грунта безразлично вращение диска. Тогда мгновенная сила набегающего грунта

$$F_{e-\delta} = m_{e-\delta} \cdot v_{\delta}. \quad (15)$$

Время перемещения диска на расстояние  $s_{\delta}$  при разработке грунта объемом один кубический метр  $\tau_{\delta}$ . Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску диска, при разработке грунта объемом один кубический метр

$$F_{\Sigma e-\delta} = F_{e-\delta}\tau_{\delta}. \quad (16)$$

Энергия, затрачиваемая на преодоление напора грунта на фаску диска,

$$u_{e-\delta} = F_{e-\delta}s_{\delta}. \quad (17)$$

*Затраты энергии на ускорение грунта фаской диска*

Отрезанный пласт грунта набегаёт на фаску лезвия диска, тормозится ею. Одновременно фаска лезвия диска ускоряет фрагменты пласта грунта в сторону. Сдвиг грунта в сторону фаской лезвия диска происходит на величину толщины диска  $b$  (рисунок 1). Ввиду связности грунта и небольшого расстояния сдвига предположим, что сдвиг происходит перпендикулярно направлению движения агрегата. Предположим также, что время ускорения каждого фрагмента пласта грунта определяет путь  $s_{пф\delta}$  перемещения этого фрагмента по фаске лезвия диска. Начальная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата и равна нулю:  $v_{нач} = 0$ . Скорость поступательного перемещения диска  $v_{\delta}$ . Так как вектор скорости грунта до взаимодействия с фаской диска направлен горизонтально, параллельно направлению движения агрегата, то конечная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата при сходе с фаски:

$$v_{пф\delta} = v_{\delta} \tan 25^{\circ}. \quad (18)$$

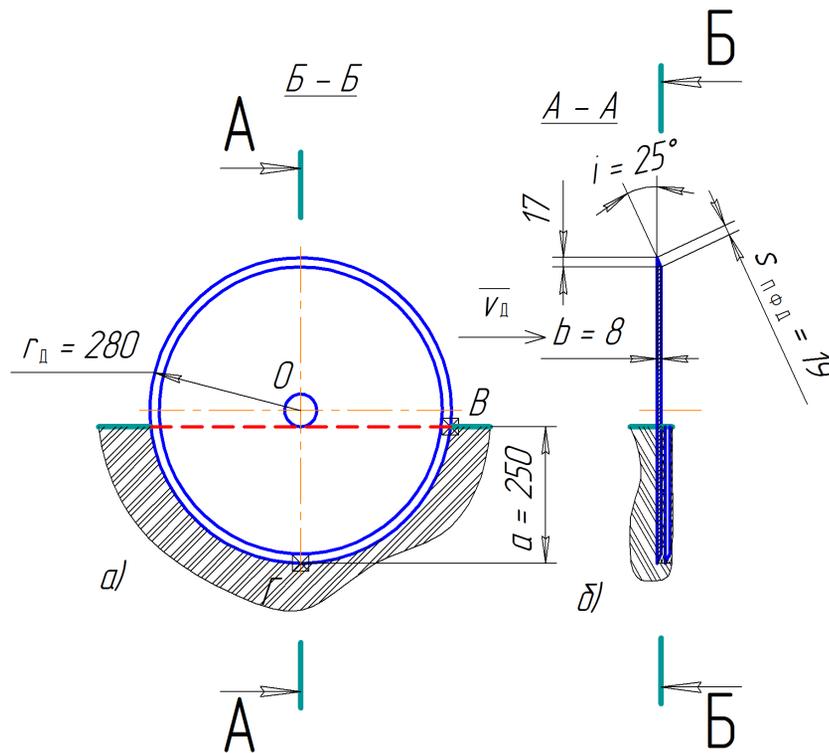


Рисунок 1 – К определению пути перемещения фрагмента грунта по фаске лезвия диска: а – сечение В – В; б – сечение А – А. Составлено автором

Figure 1 – To determine the path of a soil fragment along the chamfer of a disc blade: a – section B – B; b – section A – A. Compiled by the author

Поскольку угол заточки лезвия диска  $25^\circ$  меньше угла трения грунта о сталь, примем скорость грунта вдоль фаски диска равной скорости  $v_\delta$ . Время перемещения грунта по фаске на расстояние  $s_{пф\delta}$ :

$$\tau_\phi = \frac{s_{пф\delta}}{v_\delta} \quad (19)$$

Векторы скоростей отдельных частиц грунта в результате воздействия на них фаски диска могут иметь различное направление, однако преимущественным будет направление, перпендикулярное направлению движения агрегата. Допустим, все частицы грунта в результате воздействия на них фаски диска получают ускорение, направление которого перпендикулярно направлению движения агрегата. Тогда ускорение, создаваемое фаской лезвия диска, равно отношению скорости  $v_{пф\delta}$  отрезанного слоя грунта на сходе с фаски в направлении, перпендикулярном направлению движения агрегата, к времени  $\tau_\phi$  пере-

мещения грунта по фаске. Ускорение грунта фаской в направлении, перпендикулярном направлению движения агрегата,

$$a_{пф\delta} = \frac{v_{пф\delta} - v_{нач}}{\tau_\phi} \quad (20)$$

Масса грунта объёмом один кубический метр, разрыхляемого одним условным диском,  $m_{общ\delta}$ . Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата,

$$F_{\Sigma j_{пф\delta}} = a_{пф\delta} m_{общ\delta} \quad (21)$$

Затраты кинетической энергии на перемещение грунта фаской лезвия диска в направлении, перпендикулярном движению агрегата,

$$u_{пф\delta} = \frac{m_{общ\delta} v_{пф\delta}^2}{2} \quad (22)$$

*Затраты энергии на преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска*

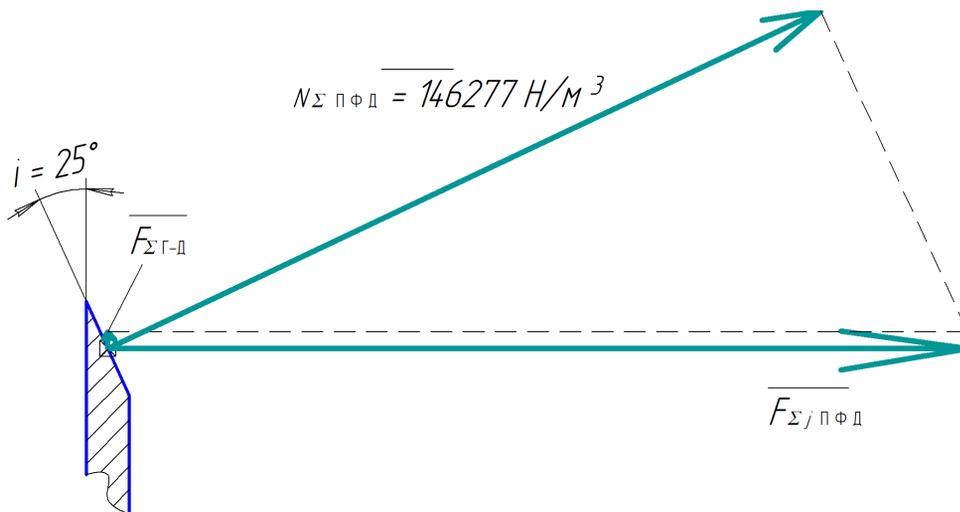


Рисунок 2 – Схема условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт.  
Составлено автором

Figure 2 – Diagram of the conditional forces of the blade chamfer on the soil.  
Compiled by the author

На рисунке 2 сложим: условную силу  $F_{\Sigma \Gamma-\Delta}$  воздействия поступающего грунта на фаску и условную силу  $F_{j \Pi \Phi}$  инерции грунта в направлении, перпендикулярном движению агрегата, спроецировав их на направление, перпендикулярное поверхности фаски лезвия диска.

Из рисунка 2 условная нормальная реакция фаски лезвия диска. Она равна нормальной реакции фаски лезвия диска, как будто бы фаска одновременно воздействует на грунт объемом один кубический метр. Так как все составляющие её силы изменяются со средней частотой, равной пути микроотрыва грунта, её следует привести к этому расстоянию. Приведенную нормальную реакцию фаски к расстоянию определим из пропорции:

$$F_{\text{норм } \partial} = F_{\Sigma \text{ отд } \Delta} \frac{l_{\text{опр}}}{s_{\partial}}, \quad (23)$$

Сила трения грунта о фаску лезвия диска

$$F_{\text{тр } \partial} = f N_{\text{н } \partial}. \quad (24)$$

Общий путь грунта по фаске лезвия диска  $s_{\partial}$ . Энергия на преодоление трения грунта о фаску лезвия диска

$$u_{\text{тр } \partial} = F_{\text{тр } \partial} \cdot s_{\partial}. \quad (25)$$

*Затраты энергии на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска*

Определим затраты энергии на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска, исходя из известных сил с последующей корректировкой результата.

На нормальную реакцию боковой поверхности диска оказывают влияние:

- сила воздействия передней кромки лезвия диска, необходимая для преодоления сцепления грунта, и направленная перпендикулярно фаске лезвия диска;

- сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты, направленная также перпендикулярно фаске лезвия диска;

- сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата;

- сила  $F_{\text{тр } \partial}$  трения грунта о фаску лезвия диска.

Все условные силы рассчитаны на разработку грунта объемом один кубический метр одним условным диском. Путь диска при разработке грунта объемом один кубический метр  $s_{\partial}$ . Приведем условные силы к расстоянию микроотрыва  $l_{\text{опр}}$ :

$$F_{\text{норм } \partial} = F_{\Sigma \text{ отд } \Delta} \frac{l_{\text{опр}}}{s_{\partial}}, \quad (26)$$

$$F_{\text{фр}} = F_{\Sigma \text{ фр } \partial} \frac{l_{\text{опр}}}{s_{\partial}}, \quad (27)$$

$$F_{j \Pi \Phi \partial} = F_{j \Pi \Phi} \frac{l_{\text{опр}}}{s_{\partial}}. \quad (28)$$

Приложим к фрагменту диска силы воздействия диска на грунт и определим нормальную реакцию боковой поверхности

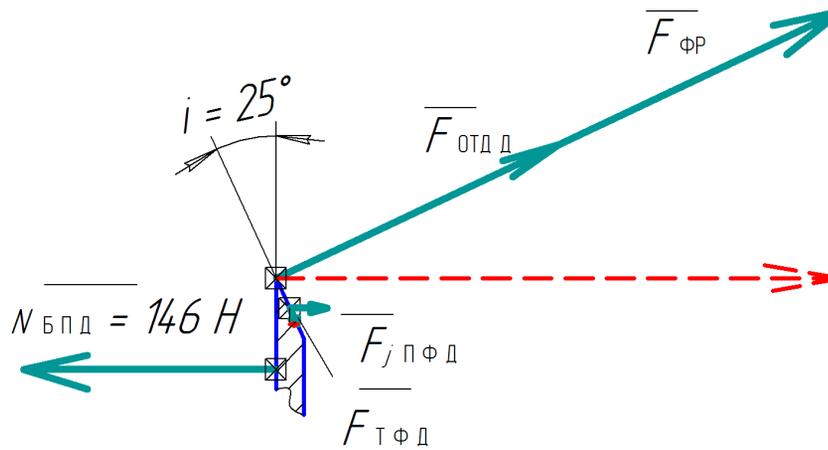


Рисунок 3 – Схема сил к определению нормальной реакции боковой поверхности диска на воздействие грунта. Составлено автором

Figure 3 – Force diagram to determine the normal reaction of the disc side to the soil. Compiled by the author

диска (рисунок 3). Силы  $F_{отр\delta}$  и  $F_{фр}$  приложим к кромке лезвия фрагмента диска, силы  $F_{н\phi\delta}$  и  $F_{т\phi\delta}$  – к фаске лезвия. Спроецируем силы  $F_{отр\delta}$ ,  $F_{фр}$ ,  $F_{т\phi\delta}$  на направление, перпендикулярное плоскости диска (основная штриховая линия). Сложив эти проекции и силу  $F_{н\phi\delta}$ , получим равнодействующую силу, перпендикулярную плоскости диска (на рисунке не показана). Нормальная реакция  $N_{б\phi\delta}$  боковой поверхности диска на воздействие грунта направлена в противоположную сторону, но не равна равнодействующей силе. Большая доля равнодействующей силы компенсируется упругостью диска и передается на раму дискового рыхлителя.

Для решения проблемы примем гипотезу: нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта пропорциональна доле боковой поверхности диска, погруженной в грунт. Сила трения грунта о боковую поверхность диска

$$F_{т\phi\delta} = fN_{б\phi\delta}. \tag{29}$$

Энергия на преодоление трения грунта о боковую поверхность диска

$$u_{т\phi\delta} = F_{т\phi\delta} s_{\delta}. \tag{30}$$

Объемные затраты энергии на резание грунта дисками

Суммарные объемные затраты энергии на резание грунта дисками, кроме энергии на резание корней,

$$\Sigma u_{\delta} = u_{общ\ пер} + u_{отр\delta} + u_{фр} + u_{э-\delta} + u_{н\phi\delta} + u_{т\phi\delta} + u_{т\phi\delta}. \tag{31}$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, диск погружен в грунт на глубину  $a = 0,25$  м. Для выявления затрат энергии на резание грунта объемом один кубический метр агрегатом в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя используем результаты предыдущих расчетов [1]: горизонтальная составляющая сопротивления перемещению переднего диска, погруженного в грунт на глубину  $a$ ,  $R_{э\ пер} = 4260$  Н. Скорость агрегата  $v_{\delta} = 2$  м/с. Время разработки одного кубического метра грунта  $\tau_{\delta p} = 1,85$  с.

Потребляемая мощность на резание грунта передним диском (1):

$$N_{общ\ пер} = 4260 \cdot 2 = 8605 \text{ Вт}.$$

Объемные затраты энергии на резание грунта передним диском (2):

$$u_{общ\ пер} = 8605 \cdot 1,85 = 15919 \text{ Дж/м}^3.$$

Допустим, не многодисковый рыхлитель, а один условный диск осуществляет полузажатое резание грунта шириной захвата  $b' = 0,012$  м. Тогда для разработки одного кубического метра грунта этот диск должен переместиться на расстояние (3):  $s_{\delta} = \frac{1}{0,25 \cdot 0,012} \approx 333 \text{ м/м}^3$ .

Время перемещения на это расстояние (4):  $\tau_{\delta} = \frac{333}{2,02} = 164,85 \text{ с/м}^3$ .

Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия диска (5):

$$S_{отр\delta} = 0,25 \cdot 333 = 83,25 \text{ м}^2/\text{м}^3 = \\ = 83250000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение  $\sigma_p^g = 0,04 \text{ МПа}$ . Условная сила воздействия передней кромки лезвия одного условного диска, необходимая для преодоления сцепления грунта (6),

$$F_{\Sigma\text{отд}\delta} = 0,04 \cdot 83250000 = 3330000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве  $h_{отр} = 1 \text{ мм}$ . Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объемом один кубический метр (7):

$$u_{отр\delta} = 3330000 \cdot 0,001 = 3330 \text{ Дж/м}^3.$$

Примем коэффициент, учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с плоскостью и наличие трещин-ответвлений,  $k_{уп} = 1,5$  для пласта грунта толщиной 12 мм. Примем среднее расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты равным пути агрегата, на котором произойдет один микроотрыв,  $l_{отр} \approx 18 \text{ мм} = 0,018 \text{ м}$ . Площадь отделения одного фрагмента от другого (8):

$$S_{фр} = 1,5 \cdot 250 \cdot 12 = 4500 \text{ мм}^2.$$

На  $s_{\delta} = 333 \text{ м}$  расстоянии произойдет разрывов пласта от воздействия диска (9):

$$n_{пл\delta} = \frac{333}{0,018} = 18500.$$

Суммарная площадь разрывов пласта (10):

$$S_{\Sigma\text{фр}} = 4500 \cdot 18500 = 83250000 \text{ мм}^2.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты (11),

$$F_{\Sigma\text{фр}} = 0,04 \cdot 83250000 = 3330000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения при разделении пласта на фрагменты  $h_{отр} = 1 \text{ мм}$ . Энергия на разделение пласта на фрагменты при разработке грунта объемом один кубический метр (12):

$$u_{фр} = 3330000 \cdot 0,001 = 3330 \text{ Дж/м}^3.$$

Отрезанный пласт грунта набегаем на фаску лезвия диска со скоростью  $v_{\delta} = 2 \text{ м/с}$ . Глубина разработки грунта  $a = 0,25 \text{ м}$ , ширина срезаемого диском слоя грунта  $b' = 0,012 \text{ м}$ . Объем грунта, непосредственно воздействующего на фаску диска в секунду (13),  $\frac{V_{\delta-\delta}}{\tau_{\delta-\delta}} = 0,25 \cdot 0,012 \cdot 2,02 \approx 0,006 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Допустим, плотность грунта  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ . Масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду (14),  $m_{\delta-\delta} = 1600 \cdot 0,006 = 9,6 \text{ кг/с}$ .

Допустим, конечная скорость набегающего грунта  $v_{кон} = 0$ . Тогда мгновенная сила  $F_{\delta-\delta}$  набегающего грунта равна (15):  $F_{\delta-\delta} = 9,6 \cdot 2 = 19,4 \text{ Н/с}$ .

Время перемещения диска на расстояние  $s_{\delta}$  при разработке грунта объемом один кубический метр  $\tau_{\delta} = 164,85 \text{ с/м}^3$ . Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску диска, при разработке грунта объемом один кубический метр (16):  $F_{\Sigma\delta-\delta} = 19,4 \cdot 164,85 \approx 3197 \text{ Н/м}^3$ .

Энергия, необходимая на преодоление напора грунта на фаску диска (17),  $u_{\delta-\delta} = 19,4 \cdot 333 = 6460 \text{ Дж/м}^3$ .

Сдвиг грунта в сторону фаской лезвия диска происходит на величину  $b = 0,008 \text{ м}$  (см. рисунок 1). Угол заточки лезвия диска  $25^\circ$  без учета его трансформации. Перемещение грунта по фаске лезвия диска  $s_{пф\delta} = 19 \text{ мм}$  [1]. Начальная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата и равна нулю:  $v_{нач} = 0$ . Скорость диска параллельна направлению движения агрегата  $v_{\delta} = 2 \text{ м/с}$ . Конечная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата при сходе с фаски (18):  $v_{пф\delta} = 2 \cdot 0,4663 = 0,94 \text{ м/с}$ .

Время перемещения грунта по фаске на это расстояние  $s_{пф\delta}$  (19):  $\tau_{ф} = \frac{0,019}{2,02} = 0,0094 \text{ с}$ .

Ускорение грунта фаской (20):  $a_{пф\delta} = \frac{0,94-0}{0,0094} = 100 \text{ м/с}^2$ .

Масса грунта объемом один кубический метр, разрыхляемого одним диском,  $m_{общ\delta} = 1600 \text{ кг/м}^3$  [1]. Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата (21),

$$F_{\Sigma\text{пф}\delta} = 100 \cdot 1600 = 160000 \text{ Н/м}^3.$$

Затраты кинетической энергии на перемещение грунта фаской лезвия диска в направлении, перпендикулярном движению агрегата (22),

$$u_{пф\delta} = \frac{1600 \cdot 0,94^2}{2} \approx 707 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 2 совокупная условная нормальная реакция фаски лезвия диска  $N_{\Sigma пф\delta} = 146277 \text{ Н/м}^3$ . Так как все составляющие её силы изменяются со средней частотой, равной пути  $l_{опр}$ , её следует привести к этому расстоянию. Приведенную нормальную реакцию фаски к расстоянию  $l_{опр}$  определим из пропорции (23):  $N_{пф\delta} = 146277 \frac{0,018}{333} \approx 8 \text{ Н}$ .

Сила трения грунта о фаску лезвия диска (24):

$$F_{мф\delta} = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ Н}.$$

Путь грунта по фаске лезвия диска  $s_{\delta} = 333 \text{ м}$ . Энергия на преодоление трения грунта о фаску лезвия диска (25):  $u_{мф\delta} = 4 \cdot 333 = 1332 \text{ Дж/м}^3$ .

Путь диска при разработке грунта объёмом один кубический метр  $s_{\delta} = 333 \text{ м}$ . Приведём обобщённые силы к расстоянию микроотрыва  $l_{опр} = 0,018 \text{ м}$  (26, 27, 28):

Соответственно,

$$F_{опр\delta} = 3330000 \frac{0,018}{333} = 180 \text{ Н};$$

$$F_{фр} = 3330000 \frac{0,018}{333} \approx 180 \text{ Н};$$

$$F_{jпф\delta} = 160000 \frac{0,018}{333} = 8,6 \text{ Н}.$$

Приложим к фрагменту диска силы воздействия диска на грунт и определим результирующую силу (см. рисунок 3). Из построений (см. рисунок 1), если всю боковую плоскость диска принять равной 1, доля боковой поверхности диска, погружённой в грунт, равна 0,437. Нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта  $N_{бп\delta} = 336 \cdot 0,437 = 146 \text{ Н}$ .

Сила трения грунта о боковую поверхность диска (29):

$$F_{мбп\delta} = 0,5 \cdot 146 = 73 \text{ Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о боковую поверхность диска (30):

$$u_{мбп\delta} = 73 \cdot 333 = 48895 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками (31):

$$\Sigma u_{\delta} = 15919 + 3330 + 3330 + 6460 + 707 + 1332 + 48895 = 79816 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно получить только экспериментальным путём. Их следует прибавить к суммарным объёмным затратам энергии. Структура вычисленных затрат энергии на резание грунта дисками показана на рисунке 4.

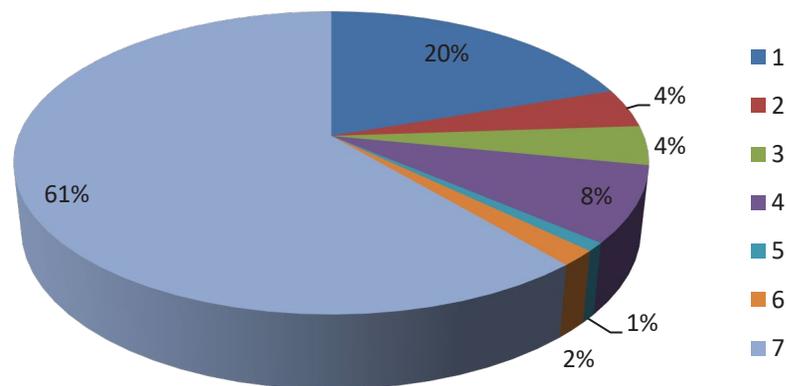


Рисунок 4 – Структура затрат энергии на резание грунта дисками: 1 – энергия на резание грунта передним диском; 2 – энергия на отделение пласта грунта от его массива; 3 – энергия на разделение пласта на фрагменты; 4 – энергия на преодоление напора грунта на фаску диска; 5 – энергия на ускорение грунта фаской лезвия диска; 6 – энергия на преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска; 7 – энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Составлено автором

Figure 4 – Structure of energy consumption for cutting soil with discs: 1 – energy for cutting soil with front disc; 2 – energy for separation of soil layer from its massif; 3 – energy for splitting soil layer into fragments; 4 – energy for overcoming soil pressure on disc bevel; 5 – energy for soil acceleration by disc blade bevel; 6 – energy for overcoming friction between soil and disc blade chamfer; 7 – energy for overcoming friction between soil and lateral surface of disc. Compiled by the author

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых теоретических исследований выявлены объёмные затраты энергии на резание грунта дисками:  $u_{\text{общ}} = 79816$  Дж/м<sup>3</sup>. К ним необходимо добавить затраты энергии: на резание корней кромками лезвий дисков, на перемещение дискового рыхлителя. В структуре известных затрат энергии преобладает энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Так как затраты энергии на резание грунта дисками весьма велики, в агрегате для формирования подстилающего слоя их применение нецелесообразно. Это не исключает применение дисковых рыхлителей для других целей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев В. А. Геометрические, кинематические и динамические параметры дискового рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2021. № 5. С. 476–487.
2. Николаев В. А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. № 2. С. 172–181.
3. Николаев В. А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. №6. С. 676–688.
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. 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.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезвьевых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. 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.
10. 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.
11. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.

12. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421-428.

13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142-166.

14. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. P. 150-163.

15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96-103.

16. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.

17. Баловнев В. И., Данилов П. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.

18. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.

19. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.

20. 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.

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

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

23. 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.

24. 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.

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

## REFERENCES

1. Nikolaev V.A. Geometric, kinematic and dynamic parameters of the disk ripper. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2021. 5: 476-487.
2. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground]. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2020. 2: 172-181. (In Russian)

3. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstvija dlja formirovaniya podstilaushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 6: 676-688. (In Russian)
4. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchytom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction] *Construction and road machinery*, 2008. 4: 36-42. (In Russian)
5. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevyimi frezami [Determination of the cost of specific energy for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*, 2010. 1: 20-22. (In Russian)
6. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezo [Determination of the critical cutting depth for combined cutting of soils with a hydrophreeze]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)
7. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin. *Construction and road machinery*, 2010. No11. Pp. 44-48. (In Russian)
8. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu. *Construction and road machinery*, 2010. No 11. Pp. 34-38.
9. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofreznykh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh gruntov. *Construction and road machinery*, 2012. No 8. Pp. 42-44.
10. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistances in the development of soils with a ripper according to the integral strength index]. *Construction and road machines*, 2005. 3: 38-40. (In Russian)
11. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003. 36: 115-128.
12. 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.
13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013. 86: 142-166.
14. 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.
15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006. 12: 96-103.
16. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007: 448.
17. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemykh nozhevykh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*, 2017. 2: 12-15.
18. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Development of the soil with a scraper in the conditions of free cutting]. *Construction and road machines*, 2016. 2: 7-10.
19. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelya s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016. 11: 18-20.
20. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of soil digging by rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016. 4: 23-28. (In Russian)
21. Syomkin D.S. O vliyanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of the resistance to cutting the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 1: 37-43. (In Russian)
22. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method of calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*, 2019. 5: 31-39. (In Russian)
23. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the composition of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 5: 32-39. (In Russian)
24. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 1: 47-54. (In Russian)
25. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *Tractors and agricultural machines*, 2017. 7: 13-19. (In Russian)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

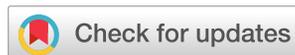
Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department.

УДК 629.464

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-24-35>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ СНЕЖНОЙ МАССЫ

**Д.С. Алешков, М.В. Суковин\****Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),**г. Омск, Россия**denisaleshkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4204-7221>,**sukovin\_8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3151-4341>**\*ответственный автор*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Повышение эффективности проведения снегоочистных работ обусловлено улучшением характеристик всех составляющих данного процесса, однако создание принципиально новых конструктивных схем снегоочистителей позволяет вносить качественные изменения в проблему зимнего содержания дорог, сельских территорий и т. п.

**Материалы и методы.** Представлено описание аналитических исследований зависимости, описывающей конструктивные параметры фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, на основе которых сформирована концепция принципиально новой конструкции питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Приведено описание математической модели представленной конструкции питателя.

**Результаты.** Рассмотрена конструктивная схема вертикальной фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Описаны основные допущения, принятые при составлении расчетной схемы работы вертикальной фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Получены уравнения, описывающие движение группы снежных частиц, транспортируемых вертикальной фрезой и взаимодействующих друг с другом в процессе движения, аналитические зависимости сил нормальных реакций рабочих элементов вертикальной фрезы от ее конструктивных и технологических параметров. Определены начальные условия, необходимые для численного решения представленных уравнений работы вертикальной фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

**Обсуждение и заключение.** Дано описание математической модели оригинальной конструкции питателя снегоочистителя отбрасывающего действия. Указана необходимость более полного обоснования начальных условий для численного решения уравнений работы питателя снегоочистителя отбрасывающего действия. Данная математическая модель позволяет в дальнейшем перейти к детальному исследованию описанной конструкции фрезы с целью определения рабочих диапазонов конструктивных и технологических параметров питателя с вертикальной фрезой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фрезерно-роторный снегоочиститель; питатель; фреза питателя; угол захода ленты фрезы; вертикальная фреза; математическая модель работы вертикальной фрезы; транспортирование снежной частицы; взаимодействие снежных частиц; расчетная схема вертикальной фрезы

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена после рецензирования 14.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

*Для цитирования:* Алешков Д.С. Анализ затрат энергии на резание грунта дисками / Д.С. Алешков, М.В. Суковин // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 24-35. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-24-35>

© Алешков Д.С., Суковин М.В., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-24-35>  
Original article

## MATHEMATICAL MODEL FOR VERTICAL MILLER OPERATION WHEN SNOW MASS TRANSPORTATION

Denis S. Aleshkov, Mikhail V. Sukovin\*

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

[denisaleshkov@mail.ru](mailto:denisaleshkov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4204-7221>,  
[sukovin8@mail.ru](mailto:sukovin8@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3151-4341>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** An increase in the efficiency of snow removal work is due to an improvement in the characteristics of all components of this process, however, the creation of fundamentally new design schemes for snow blowers allows us to make qualitative changes in the problem of winter maintenance of roads, residential areas, etc.

**Materials and methods.** A description of analytical studies of the dependence describing the design parameters of the feeder cutter for a rotary-milling snow blower is presented, on the basis of which the concept of a fundamentally new design of the feeder for a rotary-milling snow blower is formed. The description of the mathematical model of the presented design of the feeder is given.

The structural scheme of the vertical cutter of the feeder of the rotary-milling snow blower is presented. Described are the main assumptions made in the compilation of the design scheme for the operation of the vertical cutter of the feeder of the rotary-milling snow blower. Equations have been obtained that describe the movement of a group of snow particles transported by a vertical mill and interact with each other in the process of movement, analytical dependences of the forces of normal reactions of the working elements of a vertical miller on its design and technological parameters. The initial conditions for the numerical solution of the presented equations of operation of the vertical milling cutter of the feeder of a rotary-milling snow blower are described.

**Results.** The structural scheme of the vertical cutter of the feeder of the rotary-milling snow blower is described. Described are the main assumptions made in the compilation of the design scheme for the operation of the vertical cutter of the feeder of the rotary-milling snow blower. Equations are obtained that describe the movement of a group of snow particles transported by a vertical mill and interact with each other in the process of movement, analytical dependences of the forces of normal reactions of the working elements of a vertical mill on its design and technological parameters. The initial conditions necessary for the numerical solution of the presented equations of operation of the vertical milling cutter of the feeder of the milling-rotary snow blower are determined.

**Discussion and conclusion.** The description of the mathematical model of the original design of the feeder of the throw-away snow blower is given. The necessity of a more complete substantiation of the initial conditions for the numerical solution of the equations of the work of the feeder of the throwing snow blower is indicated. This mathematical model makes it possible to proceed to a detailed study of the described cutter design in order to determine the working ranges of the design and technological parameters of the feeder with a vertical cutter.

**KEYWORDS:** rotary milling snow blower; feeder; feeder cutter; the angle of entry of the cutter tape; vertical miller; mathematical model of the vertical milling cutter; snow mass transportation; interaction of snow particles; calculation scheme of vertical milling cutter

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors would like to thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**The article was submitted 08.12.2021; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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:* Aleshkov D.S., Sukovin M.V. Mathematical model for vertical miller operation when snow mass transportation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 24-35. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-24-35>

© Aleshkov D.S., Sukovin M.V., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности проведения снегоочистных работ в первую очередь обусловлено улучшением конструктивных и технологических характеристик снегоочистителей и совершенствованием их конструкции, в том числе созданием принципиально новых схем снегоочистителей. Формирование образа оригинальных конструктивных схем снегоочистителей базируется на решении задач нижних иерархических уровней, связанных с исследованием аналитических зависимостей, описывающих влияния конструктивных и технологических характеристик отдельных элементов на их поведение в системе [1]. В работах [2, 3] представлены инновационные решения в области зимнего содержания дорог, в том числе связанные со снегоочистителями отбрасывающего действия. Одними из новых тенденций в направлении развития снегоочистителей отбрасывающего действия является совершенствование их способности удалять снег большой плотности и лед, что приводит к изменению конструкции питателя снегоочистителя отбрасывающего действия [4, 5].

В общем виде машины для удаления снега с твердых покрытий подразделяются на щеточные, плужные, роторные, газоструйные<sup>1,2,3</sup>. Одним из самых массовых видов снегоочистителей отбрасывающего действия в настоящее время являются фрезерно-роторные снегоочистители (далее ФРС), особенно в сегменте ФРС малой мощности.

Предыдущие исследования были связаны с установлением закономерностей влияния основных конструктивных и технологических параметров элементов рабочих органов ФРС на производительность и энергоемкость рабочих органов ФРС, с последующей оптимизацией основных параметров с целью повышения производительности при минимальных значениях потребной мощности, так в работе [6] представлены исследования определения оптимальной рабочей скорости перемещения ФРС из условия соответствия процессов вырезания и транспортирования снежной массы снегоочистителем. Основные расчетные зави-

симости ФРС представлены в [7, 8], однако эти закономерности не отражают особенностей влияния структуры транспортируемой снежной массы на его параметры. Экспериментальные исследования сопротивления резанию и перемещению снега в питателе снегоочистителя приведены в [9].

В работе [10] был проведен сравнительный анализ выражений затрат мощностей на вырезание снежной массы из снежного массива и на транспортирование вырезанной снежной массы шнеком питателя ФРС в область загрузочного окна в зависимости от шага шнека. Это позволило автору сделать вывод о незначительности затрат мощности на транспортирование относительно затрат мощности на вырезание снежной массы и их снижении при увеличении шага шнека. Однако в процессе транспортирования формируется поток снежных частиц, который в дальнейшем загружается в метательный аппарат ФРС, что обуславливает необходимость проведения исследований влияния конструктивных и технологических параметров питателя на характеристики потока снежных частиц.

В работе [11] выполнено математическое моделирование рабочих процессов шнековых рабочих органов лесопожарной машины с использованием метода дискретных элементов, определены зависимости влияния шага и высоты ленты шнекового барабана на производительность и затраты мощности работы такого рабочего органа, однако влияние кинематических характеристик шнековых рабочих органов на эффективность их работы не было рассмотрено. Но уже в [12] представлена и исследована система дифференциальных уравнений, включающая уравнения поступательного и вращательного движения шнекового рабочего органа.

Необходимо отметить работы, в которых проведены исследования фрезы с переменной шириной ленты [13], а также исследования формирования снежного вала при отбрасывании снежной массы ротором метательного аппарата ФРС [14].

Уравнения регрессии затрачиваемой мощности от частоты вращения и шага шнека при

<sup>1</sup> Шалман Д. А. Снегоочистители. Ленинград : Машиностроение, 1973. 216 с. Текст : непосредственный.

<sup>2</sup> Иванов А. Н., Мишин В. А. Снегоочистители отбрасывающего действия. М. : Машиностроение, 1981. 159 с. Текст : непосредственный.

<sup>3</sup> Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог : учебное пособие / В. И. Баловнев, В. И. Мещеряков, М. А. Беляев [и др.]. 2-е изд., дополн. и перераб. Москва ; Омск : ОАО «Омский дом печати», 2005. 768 с. Текст : непосредственный.

формовании торфа получены в работе [15], из которых следует, как и из [11], наличие областей минимума в энергоёмкости процессов диспергирования и формования.

Однако, базируясь на результатах ранее проведенных исследований, не представляется возможным получение новых конструктивных схем снегоочистительной техники, что требует проведения более детальных исследований аналитических зависимостей, из которых формируются уравнения математической модели ФРС. Так, патенты US3395466A, US4951403A содержат элементы, удовлетворяющие условия оптимальности различных этапов работы фрезы питателя ФРС, которые представляют собой дисковые фрезы и вертикальные фрезы. Дисковые фрезы и их взаимодействия с мерзлыми грунтами и наледями достаточно глубоко изучено в работах [16]. Что касается вертикальных фрез как рабочего органа подкопной машины, то их математическая модель представлена в [17], а экспериментальные исследования описаны в [18], но указанные исследования связаны с разработкой грунта и конструкцией фрезы, не обеспечивающей эффективную загрузку вырезанной снежной массы в питатель. Некоторые особенности поведения снега при приложении к нему нагрузки приведены в [19], с точки зрения представления снега как взаимодействующих между собой частиц его характеристики представлены в [20, 21, 22, 23].

Теоретические исследования взаимодействия рабочих органов с твердыми дискретными средами в ряде случаев эффективно и наглядно проводить с использованием методов дискретных элементов<sup>4</sup> [24]. В [25] исследуется взаимодействие двух сфер, описываемых теорией Герца.

Целью данной работы является описание математической модели работы вертикальной фрезы с учетом взаимодействия транспортируемых ею снежных частиц между собой.

Основными задачами исследования являлись описание конструкции вертикальной фрезы, построение расчетной схемы, формулирование основных допущений и описание математической модели работы вертикальной фрезы при транспортировании снежной массы в область загрузочного окна.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Учитывая, что наименьшие затраты мощности наблюдаются при внедрении фрезы в

снежный массив при минимальных углах захода, можно выдвинуть предположение о том, что наиболее эффективными при разработке снежной массы больших значений плотности и модуля Юнга являются получающиеся при углах захода стремящихся к нулю дисковые фрезы. При уменьшении этих значений эффективная величина угла захода, с точки зрения энергоёмкости процесса вырезания снежной массы, возрастает и становится целесообразным уже использование фрез с углами захода, близкими к  $90^\circ$ . Однако такие схемы при их раздельном использовании не обеспечивают поперечного движения вырезанной снежной массы. Обеспечение транспортирования вырезанной снежной массы в область загрузочного окна с минимальными затратами мощности возможно при использовании такой компоновочной схемы, когда ось вращения фрез питателя располагается в вертикальной плоскости. Общий вид конструкции питателя ФРС с вертикальным расположением фрез, представляющих собой сочетание режущих дисков (дисковых фрез) и вертикальных режущих полос, представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид снегоочистительного оборудования с вертикальным расположением фрезерного оборудования

Figure 1 – General view of snow removal equipment with vertical milling equipment

Основные допущения, принятые при составлении расчетной схемы:

- фреза вращается с постоянной угловой скоростью,  $\omega_\phi$ ;
- снегоочиститель движется поступательно с постоянной скоростью;
- транспортируемая снежная масса представляет собой набор сфер одинакового радиуса,  $r_i$ ;
- вращением снежной частицы пренебрегаем;

<sup>4</sup> Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 640 с.

- снежная частица скользит по горизонтальной и вертикальной поверхности фрезы.

Расчетная схема траектории движения снежной частицы в питателе ФРС, представленном на рисунке 1, изображена на рисунке 2. При составлении расчетной схемы была введена правая ортогональная система координат XOYZ, где ось OZ направлена вертикально вверх и совпадает с осью вращения вертикальной фрезы. Ось OX параллельна основанию, а ее направление совпадает с направлением движения ФРС. Ось OY дополняет систему до правой ортогональной системы координат.

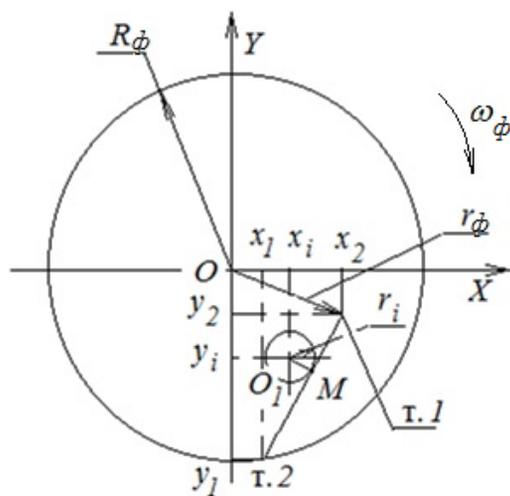


Рисунок 2 – Расчетная схема траектории движения снежной частицы транспортируемой вертикальной фрезой, вид сверху, где  $r_\phi$  – внутренний радиус режущего диска;

$R_\phi$  – наружный радиус режущего диска;  $x_i, y_i$  – координаты положения центра тяжести  $i$ -й частицы в принятой системе координат по оси OX и OY соответственно

Figure 2 – Design diagram of the trajectory of movement of a snow particle transported by a vertical milling cutter, top view, where is  $r_\phi$  – the inner radius of the cutting disc;

$R_\phi$  – outer radius of the cutting disc;  $x_i, y_i$  – are the coordinates of the position of the center of gravity of the  $i$  particle in the adopted coordinate system along the OX and OY axes, respectively

Для описанной конструктивной схемы на частицы будут действовать те же активные силы, что и в случае горизонтального расположения фрезы питателя (рисунок 3).

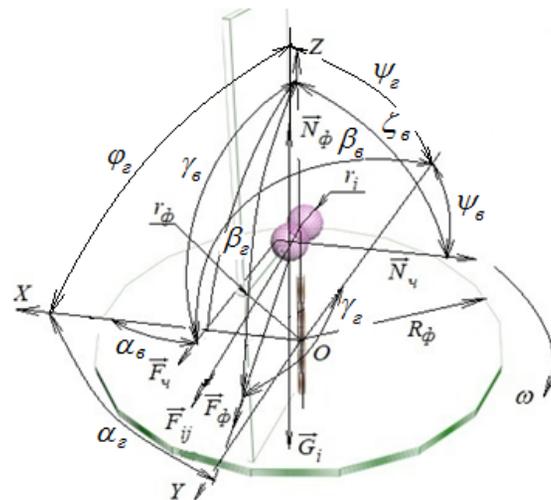


Рисунок 3 – Расчетная схема действия активных сил и сил, обусловленных наложенными связями на движение снежной частицы в вертикальной фрезе,

где  $\vec{G}_i$  – вектор силы тяжести  $i$  частицы;  $\vec{N}_{ch}$  – вектор силы нормальной реакции вертикальной режущей поверхности;  $\vec{N}_\phi$  – вектор силы нормальной реакции режущего диска;  $\vec{F}_{ch}$  – вектор силы трения между снежной частицей и вертикальной режущей поверхностью;  $\vec{F}_\phi$  – вектор силы трения между снежной частицей и режущим диском;  $\vec{F}_{ij}$  – вектор силы контактного взаимодействия

Figure 3 – The design scheme of the action of active forces, and forces caused by the imposed constraints on the motion of a snow particle in a vertical mill, where is the

$\vec{G}_i$  – vector of the gravity force of the  $i$  particle;  $\vec{N}_{ch}$  – force vector of the normal reaction of the vertical cutting surface;  $\vec{N}_\phi$  – force vector of the normal reaction of the cutting disc;  $\vec{F}_{ch}$  – the vector of the friction force between the snow particle and the vertical cutting surface;  $\vec{F}_\phi$  – the vector of the friction force between the snow particle and the cutting disc;  $\vec{F}_{ij}$  – vector of force of contact interaction

Связи также будут являться неударными и голономными. Их математическое описание будет иметь следующий вид:

- для случая безотрывного движения по поверхности режущего диска:

$$f_2 = z_i - (h_i + r_i) = 0 \quad (1)$$

В случае частицы конечного размера уравнение связи определяется из условия равенства расстояния между координатами положения частицы и линией, лежащей в плоскости вертикальной режущей полосы рабочего органа питателя, радиусу снежной частицы (см. рисунок 2):

$$f_6 = \left( \frac{x_i}{A_1} - \frac{y_i}{A_2} + \left( \frac{r_\phi \sin(\omega_\phi t)}{A_2} - \frac{r_\phi \cos(\omega_\phi t)}{A_1} \right) \right)^2 - r_i^2 \cdot \frac{A_1^2 + A_2^2}{A_1^2 \cdot A_2^2} = 0, \quad (2)$$

где

$$A_1 = R_\phi \cos(\omega_\phi t + \xi_0) - r_\phi \cos(\omega_\phi t) \neq 0,$$

$$A_2 = R_\phi \sin(\omega_\phi t + \xi_0) - r_\phi \sin(\omega_\phi t) \neq 0,$$

где  $\xi_0$  – угол начального положения вертикальной режущей полосы.

При  $\xi_0=0$ ,  $r_\phi=R_\phi$ , при других значениях  $\xi_0$  данные соотношения выполняются при  $\omega_\phi=\pi/2-\xi_0$ , что интерпретируется как необходимость смены знака действия нормальной реакции при проведении вычислений.

Косинусы углов направления проекций сил нормальных реакций на оси принятой системы координат будут равны:

- режущего диска:

$$\cos \varphi_2 = \frac{\partial f_2 / \partial x}{\Delta f_2} = 0,$$

$$\cos \psi_2 = \frac{\partial f_2 / \partial y}{\Delta f_2} = 0,$$

$$\cos \zeta_2 = \frac{\partial f_2 / \partial z}{\Delta f_2} = 1;$$

- режущей полосы:

$$\cos \varphi_6 = \frac{\partial f_6 / \partial x}{\Delta f_6} = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}},$$

$$\cos \psi_6 = \frac{\partial f_6 / \partial y}{\Delta f_6} = -\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}},$$

$$\cos \zeta_6 = \frac{\partial f_6 / \partial z}{\Delta f_6} = 0.$$

Косинусы углов направления силы трения между  $\vec{F}_\phi$  определяются по известным формулам [18]:

$$\cos \alpha_2 = \frac{\dot{x}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}},$$

$$\cos \beta_2 = \frac{\dot{y}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}},$$

$$\cos \gamma_2 = 0.$$

Косинусы углов между направлением силы трения,  $\vec{F}_\phi$ , и осями принятой системы координат, которая лежит в ее плоскости вертикальной режущей полосы и параллельна плоскости режущего диска, определяются по формулам:

$$\cos \alpha_6 = \frac{1}{A_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2}}},$$

$$\cos \beta_6 = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2}}},$$

Для определения численных значений сил нормальных реакций необходимо выполнить дифференцирование по  $t$  дважды уравнений (1), (2). Имеем

$$\frac{d^2 f_2}{dt^2} = \ddot{z}_i$$

С учетом следующих обозначений:

$$M_1 = \frac{A_2 \cos(\omega_\phi t)}{A_1^2} - \frac{A_1 \sin(\omega_\phi t)}{A_2^2} + \frac{\cos(\omega_\phi t)}{A_2} + \frac{\sin(\omega_\phi t)}{A_1},$$

$$M_2 = \frac{\sin(\omega_\phi t)}{A_2} - \frac{\cos(\omega_\phi t)}{A_1},$$

$$M_3 = \frac{\cos(\omega_\phi t)A_1^2 - A_2 \sin(\omega_\phi t)A_1 + 2A_2^2 \cos(\omega_\phi t)}{A_1^3} -$$

$$\frac{-A_2^2 \sin(\omega_\phi t) + A_1 \cos(\omega_\phi t)A_2 - 2A_1^2 \sin(\omega_\phi t)}{A_2^3} -$$

$$\frac{\sin(\omega_\phi t)A_2 + A_1 \cos(\omega_\phi t)}{A_2^2} + \frac{\cos(\omega_\phi t)A_1 + A_2 \sin(\omega_\phi t)}{A_1^2}$$

$$M_4 = \frac{A_1^2 + 3A_2^2}{A_1^4} - \frac{A_2^2 + 3A_1^2}{A_2^4},$$

$$M_5 = \frac{A_1^2 + 2A_2^2}{A_1^3},$$

$$M_6 = \frac{A_2^2 + 2A_1^2}{A_2^3}.$$

Окончательно имеем:

$$\frac{d^2 f_6}{dt^2} = 2 \left[ \frac{\dot{x}_i}{A_1} - \frac{\dot{y}_i}{A_2} + \omega_\phi x_i \frac{A_2}{A_1^2} + \omega_\phi y_i \frac{A_1}{A_2^2} + r_\phi \omega_\phi M_1 \right]^2 +$$

$$+ 2 \left( \frac{x_i}{A_1} - \frac{y_i}{A_2} + r_\phi M_2 \right) \left[ \frac{\ddot{x}_i A_1 + 2\omega_\phi \dot{x}_i A_2}{A_1^2} - \frac{\ddot{y}_i A_2 - 2\omega_\phi \dot{y}_i A_1}{A_2^2} + \right.$$

$$\left. + \omega_\phi^2 x_i M_5 + \omega_\phi^2 y_i M_6 + r_\phi \omega_\phi^2 M_3 \right] + 2\omega_\phi^2 r_{\phi i} \cdot M_4 = 0 \quad (3)$$

Уравнения движения примут вид:

$$\ddot{x}_i = -\omega^2 x_i - 2\omega \cdot \dot{y}_i + \frac{N_u}{m_{ui}} \left( \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_\phi \frac{A_1}{\sqrt{A_2^2 + A_1^2}} \right) + \frac{N_\phi}{m_{ui}} f_u \frac{\dot{x}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}} + \frac{F_{ij}^x}{m_{ui}}; \quad (4)$$

$$\ddot{y}_i = \omega^2 y_i + 2\omega \cdot \dot{x}_i + \frac{N_u}{m_{ui}} \left( \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_\phi \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) + \frac{N_\phi}{m_{ui}} f_u \frac{\dot{y}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}} + \frac{F_{ij}^y}{m_{ui}}; \quad (5)$$

$$\ddot{z}_i = \frac{N_{\phi}}{m_{\phi i}} + \frac{F_{ij}^z}{m_{\phi i}} - \frac{G}{m_{\phi i}}. \quad (6)$$

где  $f_{\phi}$  – коэффициент внешнего трения снега по поверхности режущего диска;  $f_{\psi}$  – коэффициент внешнего трения снега по вертикальной режущей поверхности.

Из данной системы уравнений с использованием уравнений связи (1), (2) можно получить выражения нормальных реакций. Для этого из третьего уравнения (6) выражаем  $N_{\phi}$  и подставляем полученное выражение в первое (4) и второе (5) уравнение. Из (3) выражаем  $\dot{y}$  и производим подстановку уравнение (5), из которого затем выражаем  $\ddot{x}$ . Приравниваем (4) и (5) уравнения и после преобразований находим  $N_{\phi}$ .

Выражение силы нормальной реакции поверхности режущего диска в явном виде находится из (6):

$$\frac{N_{\phi}}{m_{\phi i}} = g - \frac{F_{ij}^z}{m_{\phi i}}; \quad (7)$$

В результате проведенных преобразований, описанных выше, получим выражение для  $N_{\phi}$ :

$$\begin{aligned} \frac{N_{\phi}}{m_{\phi i}} = & \frac{1}{(B_1 + f_{\phi} B_2) - \frac{A_1}{A_2} (B_2 + f_{\phi} B_1)} (\omega^2 (\frac{A_1}{A_2} y_i + x_i) + 2\omega \cdot (\frac{A_1}{A_2} \dot{x}_i + \dot{y}_i) + g \cdot f_{\psi} (D_2 \frac{A_1}{A_2} - D_1) - \\ & - \frac{F_{ij}^z}{m_{\phi i}} f_{\psi} (D_2 \frac{A_1}{A_2} - D_1) + \frac{F_{ij}^y}{m_{\phi i}} \frac{A_1}{A_2} - \frac{F_{ij}^x}{m_{\phi i}}) - \\ & - [\frac{\dot{x}_i}{A_1} - \frac{\dot{y}_i}{A_2} + \omega_{\phi} x_i \frac{A_2}{A_1^2} + \omega_{\phi} y_i \frac{A_1}{A_2^2} + r_{\phi} \omega_{\phi} M_1]^2 \frac{A_1}{\frac{x_i}{A_1} - \frac{y_i}{A_2} + r_{\phi} M_2 (B_1 + f_{\phi} B_2) - \frac{A_1}{A_2} (B_2 + f_{\phi} B_1)} - \\ & - \omega_{\phi}^2 r_{\phi i}^2 \cdot \frac{M_4}{(B_1 + f_{\phi} B_2) - \frac{A_1}{A_2} (B_2 + f_{\phi} B_1)} \frac{A_1}{\frac{x_i}{A_1} - \frac{y_i}{A_2} + r_{\phi} M_2} - [\frac{2\omega_{\phi} \dot{x}_i A_2}{A_1^2} + \frac{2\omega_{\phi} \dot{y}_i A_1}{A_2^2} + \\ & + \omega_{\phi}^2 x_i M_5 + \omega_{\phi}^2 y_i M_6 + r_{\phi} \omega_{\phi}^2 M_3] \frac{A_1}{(B_1 + f_{\phi} B_2) - \frac{A_1}{A_2} (B_2 + f_{\phi} B_1)} \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$B_1 = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}},$$

$$B_2 = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}},$$

$$D_1 = \frac{\dot{x}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}},$$

$$D_2 = \frac{\dot{y}_i}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2}}.$$

Таким образом, имеем уравнения нормальных реакций (7), (8) для описанной выше конструкции роторного снегоочистителя, которые совместно с уравнениями (4), (5) образуют замкнутую систему уравнений, описывающую работу питателя снегоочистителя, из которых определяются кинематические характеристики снежных частиц. В момент времени  $t = 0$  в качестве начальных условий выступают координаты захвата снежных частиц в принятой системе координат, что касается значений проекций векторов скорости, то здесь требуется принятие дополнительных допущений, связанных с процессом захвата снежных частиц. Первый подход базируется на том, что  $\dot{x}_i$ ,  $\dot{y}_i$  и  $\dot{z}_i$  должны совпадать с проекциями вектора окружной скорости вертикальной режущей полосы. Второй подход подразумевает контактное взаимодействие снежной частицы и вертикальной режущей полосы с возможной потерей одной или всех связей частицы с элементами вертикальной фрезы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Получена замкнутая система уравнений, позволяющая однозначно определять силы, действующие со стороны снежных частиц, формирующих транспортируемую снежную массу, на элементы конструкции вертикального ротора. На основании которых в дальнейшем возможно произвести оптимизацию основных конструктивных и технологических параметров вертикальной фрезы рассматриваемой конструкции питателя ФРС. Также определить потребляемую мощность вертикальной фрезой на транспортирование снежной массы. Решение описанной системы диф-

ференциальных уравнений второго порядка может быть решена на ЭВМ, в соответствии с алгоритмами метода дискретных элементов. При этом в качестве силы взаимодействия между частицами в первом приближении можно воспользоваться теорией контактного взаимодействия Герца. Получены основные ограничения, накладываемые на процесс решения полученной системы уравнений работы вертикальной фрезы питателя ФРС. Установлено, что общее количество действующих сил на транспортируемую снежную частицу соответствует числу сил при ее транспортировании горизонтально расположенной фрезой в питателе ФРС.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составлена расчетная и математическая модель работы вертикальной фрезы питателя ФРС. Система уравнений и значений сил нормальных реакций поверхностей позволяет оценить влияние конструктивных параметров на действующие силы со стороны транспортируемой снежной массы на конструкцию фрезы, проводить оптимизацию конструкции вертикального ротора, в частности осуществлять выбор геометрических параметров вертикальных режущих полос и режущих дисков, определить технологические параметры режимов работы рассматриваемой конструкции питателя. Даны два варианта задания начальных условий решения уравнений математической модели работы вертикальной фрезы питателя ФРС, которые требуют более строгого теоретического обоснования и последующей экспериментальной проверки. Представленная математическая модель позволяет в дальнейшем перейти к исследованию описанной конструкции фрезы, имеющей более сложную поверхность рабочих элементов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виброзащитная система с нелинейными упругими и демпфирующими характеристиками / М.С. Кобытов, В.С. Щербаков, В.В. Титенко, И.Е. Почкуева // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8, № 1. С. 46–54. DOI 10.25206/2310-9793-8-1-46-54.
2. Wang, Z.: Discussion on the Status of Domestic Snow and Ice Removing Machinery, Construction Machinery, 7, 2002, 46–47.
3. Guo, Z. et al.: Study on the Snow and Ice Removing Technology of the Roads, Transportation Science and Technology, 5, 2011, 71–74.
4. Li, Yaqin & Han, Yangyang & Wang, Junfa & Zhuang, Tengfei & Ge, Yiyuan & Zou, Aihua & Wu,

- Hongshan. (2017). Comparative Analysis of the Snow Clearing Performance Test of the Concave Disc and Vertical Milling Prototype. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 10.12783/dtetr/mime2016/10214.
5. Wang, Gang. (2016). A design on centrifugal ice breaking and snow removal system based on ADAMS. *Computer-Aided Design and Applications*. 14. 1-12. 10.1080/16864360.2016.1223424.
6. Закиров М. Ф. Оптимизация рабочей скорости фрезерно-роторного снегоочистителя // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 10. С. 55–57.
7. Xingzhuihui1a L. Structure design of small road snow remover // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1939. – Т. 2021. – С. 012054.
8. Баланик М. М., Гребеньков Д. В. Определение оптимальных параметров базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя // *Вестник современных исследований*. 2019. № 1.13(28). С. 57–60.
9. Закиров М. Ф. Исследование сопротивления резанию и перемещению снега шнеком малогабаритного шнекороторного снегоочистителя // *Техника и технология транспорта*. 2019. № S(13). 10 с.
10. Закиров М. Ф. Исследование влияния шага шнека на мощность привода питателя малогабаритного шнекороторного снегоочистителя // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2015. № 2 (26). С. 56–57.
11. Bartenev, I & Malyukov, S & Malyukova, M. (2020). Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 595. 012013. 10.1088/1755-1315/595/1/012013.
12. Попиков П. И., Поздняков А. К. Математическая модель взаимодействия шнековых рабочих органов лесопожарных грунтометательных машин с напочвенным покровом // *Лесотехнический журнал*. 2021. Т. 11, № 1(41). С. 163–171. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/15.
13. Алешков Д. С., Аюпова Н. Ю. Обоснование ширины ленты фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 2(54). С. 7–11.
14. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation / D.S. Aleshkov, M.V. Sukovin, M.V. Banket [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2021. – Vol. 19. – No 1. – P. 9-16. – DOI 10.5937/jaes0-28018.
15. Яблонев А. Л., Гусева А. М. Исследование энергоемкости формования кускового торфа // *Труды Инсторфа*. 2020. № 22(75). С. 20–27.
16. Определение усилий, возникающих на дисковом резце при блокированном резании мерзлых грунтов / Р. Б. Желукевич, Н. И. Селиванов, Ю. Ф. Кайзер, А. В. Лысянников // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 8(2). С. 66–78.
17. Кузнецова В. Н., Кирюшкина Н. А. Анализ математического описания процесса взаимодействия фрезерного рабочего органа с разрабатываемой средой // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 6(46). С. 102–106.
18. Федотенко Ю. А., Реброва И. А., Булаева Д. В. Экспериментальные исследования режущих элементов рабочего органа подкапывающей машины // *Вестник СибАДИ*. 2014. № 1(35). С. 38–42.
19. Тургумбаев Ж. Ж., Гапарова Ж. Т., Башиков И. Т. Результаты лабораторных исследований по оценке физикомеханических свойств снега // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2012. № 26. С. 116–121.
20. Numerical study on granule aggregation and breakage in fluidized bed granulation by a novel PBM with DEM-CFD coupling approach Kentaro Hayashi, Hideya Nakamura, Satoru Watano.
21. Boutanios, Ziad. (2018). Two-way Coupled Eulerian-Eulerian Finite Volume Simulation of Drifting Snow.
22. L. Zhao, Z. Yu, F. Zhu, X. Qi, S. Zhao. CFD-DEM modeling of snowdrifts on stepped at roofs. *Wind and Structures*, 23(6):523542, 2016
23. Modeling of dry snow adhesion during normal impact with surfaces Tobias Eidevåg, Per Abrahamsson, Matthias Eng, Anders Rasmuson
24. Zheng, Zumei & Zang, Mengyan & Chen, Shunhua & Zhao, Chunlai. (2016). An improved 3D DEM-FEM contact detection algorithm for the interaction simulations between particles and structures. *Powder Technology*. 305. 308-322. 10.1016/j.powtec.2016.09.076.
25. Balevičius, R. & Mróz, Zenon. (2013). A finite sliding model of two identical spheres under displacement and force control - Part I: Static analysis. *Acta Mechanica*. 224. 10.1007/s00707-013-0839-9.

## REFERENCES

1. Vibrozashhitnaja sistema s nelinejnymi uprugimi i dempifirujushhimi harakteristikami [Vibration protection system with nonlinear elastic and damping characteristics] / M. S. Korytov, V. S. Shcherbakov, V. V. Titenko, I. E. Pochekueva // *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2020. 8(1): 46-54. – DOI 10.25206/2310-9793-8-1-46-54.
2. Wang, Z.: Discussion on the Status of Domestic Snow and Ice Removing Machinery, *Construction Machinery*, 2002, 7: 46–47.
3. Guo, Z. et al.: Study on the Snow and Ice Removing Technology of the Roads, *Transportation Science and Technology*, 5, 2011, 71–74.
4. Li, Yaqin & Han, Yangyang & Wang, Junfa & Zhuang, Tengfei & Ge, Yiyuan & Zou, Aihua & Wu, Hongshan. (2017). Comparative Analysis of the Snow Clearing Performance Test of the Concave Disc and Vertical Milling Prototype. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 10.12783/dtetr/mime2016/10214.
5. Wang, Gang. (2016). A design on centrifugal ice breaking and snow removal system based on ADAMS. *Computer-Aided Design and Applications*. 14. 1-12. 10.1080/16864360.2016.1223424.

6. Zakirov, M.F. Optimization of the working speed of the rotary-milling snowplow / M.F. Zakirov // *Construction and road machines*. 2015. 10: 55-57.
7. Xingzhihu1a L. Structure design of small road snow remover // *Journal of Physics: Conference Series*. 1939. 2021. 012054.
8. Balanik, M.M., Grebenkov D.V., Determination of the optimal parameters of the base machine of a rotary-milling snow blower / M.M. Balanik, D.V. Grebenkov // *Bulletin of modern research*. 2019. 1.13 (28): 57-60.
9. Zakirov, M.F. Research of resistance to cutting and movement of snow by auger of a small-sized auger snow blower / M.F. Zakirov // *Technics and technology of transport*. 2019. S (13): 10.
10. Zakirov M.F. Investigation of the effect of the auger pitch on the power of the feeder drive of a small-sized auger-rotor snowplow. *Intelligent systems in production*. 2015; 2: 56-57. (in Russian)
11. Bartenev, I & Malyukov, S & Malyukova, M. (2020). Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 595. 012013. 10.1088/1755-1315/595/1/012013.
12. Popikov, Petr & Pozdnyakov, Anton & Uskov, Vladimir & Lysych, Mihail & Gnusov, Maksim. (2021). THEORETICAL STUDY OF THE KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE AUGER WORKING BODY OF A FOREST FIRE GROUND-THROWING MACHINE. *Forestry Engineering Journal*. 11. 140-151. 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12.
13. Aleshkov, D.S., Ayupova N. Y. Obosnova niye shiriny lenty frezy pitatelya frezerno-kotornogo snegoochistitelya [Justification of the cutter belt width of the milling-rotary snow plough feeder] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017, 2(54): 7-11. (In Russian).
14. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation / D.S. Aleshkov, M.V. Sukovin, M.V. Banket [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. 19. 1: 9-16. – DOI 10.5937/jaes0-28018.
15. Yablonev A.L. [STUDY OF THE ENERGY INTENSITY OF SOD PEAT FORMING] / A.L. Yablonev, A.M. Guseva // *Trudy Instorfa Proceedings of the Institute*, 2020, 22(75): 20-27. (In Russian)
16. Opredelenie usilij, voznikajushhij na diskovom rezce pri blokirovannom rezanii merzlyh gruntov / R. B. Zhelukevich, N. I. Selivanov, Ju. F. Kajzer, A. V. Lysjannikov // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015. 8-2: 66–78, [in Russian].
17. Kuznetsova V.N., Kiryushkina N.A. Analiz matematicheskogo opisaniya protsessa vzaimodeystviya frezernogo rabocheho organa s razrabatyvayemoy sredoy [Analysis of mathematical describe the interaction cutter working body develops environment] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2015, 6(46): 102-106. (In Russian)
18. Fedotenko Y.A., Rebrova I.A., Bulaeva D.V. Eksperimental'nyye issledovaniya rezhushchikh elementov rabocheho organa podkapyvayushchey mashiny [The laboratory experiments in study of the earth-moving machine working] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2014. 1(35): 38-42.
19. Turgumbaev, Zh. Zh. Results of laboratory studies to assess the physical and mechanical properties of snow / Zh. Zh. Turgumbaev, Zh. T. Gaparova, IT Bashikov // *Bulletin of the Kyrgyz State Technical University. I. Razzakov*. 2012. 26: 116-121.
20. Numerical study on granule aggregation and breakage in fluidized bed granulation by a novel PBM with DEM-CFD coupling approach Kentaro Hayashi, Hideya Nakamura, Satoru Watano.
21. Boutanios, Ziad. (2018). Two-way Coupled Eulerian-Eulerian Finite Volume Simulation of Drifting Snow.
22. L. Zhao, Z. Yu, F. Zhu, X. Qi, S. Zhao. CFD-DEM modeling of snowdrifts on stepped at roofs. *Wind and Structures*, 2016, 23(6):523542.
23. Modeling of dry snow adhesion during normal impact with surfaces Tobias Eidevåg, Per Abrahamsson, Matthias Eng, Anders Rasmuson
24. Zheng, Zumei & Zang, Mengyan & Chen, Shunhua & Zhao, Chunlai. (2016). An improved 3D DEM-FEM contact detection algorithm for the interaction simulations between particles and structures. *Powder Technology*. 305. 308-322. 10.1016/j.powtec.2016.09.076.
25. Balevičius, R. & Mróz, Zenon. (2013). A finite sliding model of two identical spheres under displacement and force control - Part I: Static analysis. *Acta Mechanica*. 224. 10.1007/s00707-013-0839-9.

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Алешков Д. С. Формулировка направления и темы исследования. Концептуализация, формулирование и исследование научной гипотезы. Формулирование проблемы исследований. Выбор методологии и методов исследования (50%).

Суковин М. В. Проверка теоретических предположений, аналитика результатов исследования, редактирование, формирование выводов. Валидация данных, рецензирование результатов, корреспонденция данных с иностранными авторами (50%).

#### COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis S. Aleshkov. Formulation of the direction and research topic. Conceptualization, formulation and research of a scientific hypothesis. Formulation of the research problem. Choice of research methodology and methods (50%).

Mikhail V. Sukovin. Checking theoretical assumptions, analytics of research results, editing, drawing conclusions. Data validation, peer review of results, correspondence of data with foreign authors (50%).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Алешков Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»*

*Суковин Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техносферная и экологическая безопасность».*

**AUTHORS' AFFILIATION**

*Denis S. Aleshkov, Cand, of Sci., Associate Professor of the Technical and Environmental Safety Department.*

*Mikhail V. Sukovin, Cand, of Sci., Associate Professor of the Technical and Environmental Safety Department.*

УДК 621.86

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА МЕХАНИЗМ ПОДЪЕМА КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА

**С.Д. Иванов, А.Н. Назаров\***

МГТУ им. Н. Э. Баумана,

г. Москва, Россия

*ptm-diagnostics@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>*alexnazavr@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Выявлена проблема существующих регистраторов параметров работы крана в направлении определения интенсивности работы механизмов. Определена потребность в увеличении числа информационных источников. Предложено применение текущих параметров электродвигателя в качестве источника первичной информации.

**Материалы и методы.** Представлены характеристики экспериментальной установки. Оценка достоверности информационных источников проводилась на механизме подъема. Приведены формулы определения ошибки вычисления параметров тока статора и активной мощности и определения коэффициента пропорциональности нагрузки на привод и информационного параметра.

**Результаты.** Представлены таблицы и графики вычисленной нагрузки на механизм по току статора и активной мощности во всём диапазоне рабочих нагрузок. Исследована зависимость точности определения нагрузки от изменения напряжения питающей сети.

**Выводы.** В качестве информационного источника о нагрузке на механизм подъема крана рекомендовано применять активную мощность привода. Данный параметр показал большую по сравнению с током статора устойчивость к изменениям напряжения. Удалось достичь точности определения нагрузки 2,6% при требовании 3%.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механизм крана, нагрузка на механизм, информация о нагрузке на механизм, кран мостового типа, механизм подъема, активная мощность привода

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу разработчиков приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, рекомендации, ценные замечания и критику.

**Статья поступила в редакцию 10.12.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

**Для цитирования:** Иванов С.Д. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа / С.Д. Иванов, А.Н. Назаров // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 36-47. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-36-47>

© Иванов С.Д., Назаров А.Н., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>  
Original article

## DRIVE ELECTRICAL PARAMETERS APPLICABILITY EVALUATION TO DETERMINE LOADS ON BRIDGE CRANE LIFTING MECHANISM

**Sergey D. Ivanov, Alexander N. Nazarov\***

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russia

[ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>

[alexnazavr@yandex.ru](mailto:alexnazavr@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of existing recorders of crane operation parameters in the direction of determining the intensity of work of mechanisms is revealed. The necessity of increasing the number of information sources is determined. Application of current parameters of the electric motor as a source of primary information is suggested.

**Materials and methods.** The characteristics of the experimental setup are presented. The validity of information sources has been evaluated on the lifting mechanism. Formulas for determining the error of calculating the stator current and active power parameters and for determining the coefficient of proportionality of the load on the drive and the information parameter are given.

**Results.** Tables and graphs of calculated mechanism load in terms of stator current and active power over the whole range of operating loads are presented. The dependence of accuracy of load determination on changes of supply mains voltage has been investigated.

**Conclusions.** As information source of the load on the crane hoisting mechanism it is recommended to apply an active drive power. The given parameter has shown the big stability to voltage changes in comparison with a current of stator. It was possible to reach accuracy of definition of a load of 2,6 % at requirement of 3 %.

**KEYWORDS:** crane mechanism, mechanism load, mechanism load information, bridge crane, hoisting mechanism, active drive power

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors of the article express their gratitude to the staff of the Lifting and Transport Systems Department of Bauman Moscow State Technical University and to the team of developers of safety devices ZAO CROS ITTS for their help, recommendations, valuable remarks and critics.

**The article was submitted 10.12.2021; approved after reviewing 20.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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:* Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 36-47. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

© Ivanov S.D., Nazarov A.N., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно принципам обеспечения безопасности на опасных производственных объектах, на которых эксплуатируются подъемные сооружения, необходимо выполнять соответствие грузовых характеристик и характеристик интенсивности работы, приведенных в паспорте и руководстве по эксплуатации, технологическому процессу (п. 9)<sup>1</sup>. Под характеристиками интенсивности понимают режимы работы, нагружения и использования механизмов и крана в целом [1, 2, 3]. На сегодняшний день единственным средством объективного контроля интенсивности использования грузоподъемных машин (ГПМ) являются приборы регистраторы параметров (РП) [4, 5, 6, 7, 8]. К преимуществам РП относятся получение объективной информации о работе крана, хранение информации о каждом рабочем цикле за всё время эксплуатации ГПМ, автоматическая обработка информации с предоставлением расчетных характеристик (режима работы механизмов, крана в целом, остаточного ресурса) [9, 10].

Помимо указанных преимуществ РП обладают рядом недостатков. На данный момент производители РП не подтверждают соответствия своей продукции ГОСТ 33713–2015<sup>2</sup>. Данное несоответствие РП ГОСТу объясняется не только низким качеством регистрируемой информации (для ОГШ-2<sup>3</sup> экспериментально выявлены пропуски циклов нагружения, недостаточная точность определения исходных данных и расчетных параметров)<sup>4</sup>, но и отсутствием у большинства производителей функции определения режимов работы механизмов передвижения, вместо которой РП фиксируют только наработку механизма в мото-часах. Из опыта работы с ЗАО «ИТЦ «КРОС» известен метод определения нагрузки на механизмы передвижения по массе перемещаемого груза. Недопустимость такого подхода под-

тверждается методикой расчета механизмов передвижения крана. Согласно [11, 12, 13, 14] к факторам, влияющим на нагрузку на механизм передвижения, относятся масса крана и груза, трение реборд колес о головки рельсов, уклон подкранового пути, ветровая нагрузка, динамические нагрузки разгона и торможения, раскачивание груза. Очевидно, что значение, полученное на основе единственного косвенного параметра (массы перемещаемого груза), будет далеко от реально действующей нагрузки на механизм передвижения. Таким образом, в целях соответствия существующих РП ФНП в пункте определения параметров интенсивности работы механизмов выявлена потребность в расширении информационной наполненности РП за счет внедрения новых источников информации.

Согласно ГОСТ 34017–2016<sup>5</sup> значение нагрузки на механизм определяется для конечного звена кинематической цепи (канатный барабан, ходовое колесо) с учетом всех факторов, включая процессы неустановившегося движения. В качестве значения нагрузки могут использоваться нагрузки на других элементах кинематической цепи (сила натяжения тяговых канатов, момент на тихоходном валу и др.). Это обусловлено тем, что нагрузку в любом элементе кинематической цепи можно привести к конечному звену через передаточные числа и коэффициенты полезного действия, значения которых в процессе эксплуатации изменяются незначительно.

Существует две группы способов получения информации о нагрузке на механизм: определение силомоментных характеристик в механической части привода [15, 16, 17] и определение нагрузки по текущим параметрам электродвигателя [18, 19]. Преимуществом первого способа является близость датчика нагрузки к конечному звену кинематической цепи и, соответственно, меньшая восприим-

<sup>1</sup> Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 N 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_373321/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373321/) (дата обращения: 28.11.2021).

<sup>2</sup> ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>3</sup> Руководство по эксплуатации ОГШ-2.7...10.00.00.00 РЭ URL: <http://itc-kros.ru>

<sup>4</sup> Иванова Н. Ю., Иванов С. Д. Формирование информационной базы для уточнения расчета остаточного ресурса и улучшения методики планирования ремонтов подъемно-транспортного оборудования с использованием приборов безопасности – регистраторов параметров (на примере кранов) // материалы Всероссийской научно-практической конференции. Сборник докладов в области экономики и менеджмента, а также производственных технологий, информационных технологий и технологического менеджмента. М.: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». 2019. С. 236–241.

<sup>5</sup> ГОСТ 34017–2016 Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы. М.: Стандартинформ, 2018.

Таблица 1  
Основные параметры экспериментальной установки

Table 1  
Basic parameters of the pilot installation

Кран	Грузоподъемность	Высота подъема	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Номинальная частота вращения	Груз
КМГ-201	2 т	8 м	МТКН -112-6	5 кВт	915 об/мин	10 x 0,2 т

чивость к изменению КПД элементов привода в процессе эксплуатации. Однако такой метод требует встройки датчиков в механическую часть привода, что часто приводит к значительным изменениям в конструкции, определяющим высокую стоимость и трудоемкость изготовления и монтажа узлов встройки.

Второй способ лишен данного недостатка, и для приводов с незначительно изменяющимся КПД механизма в процессе эксплуатации является менее затратной альтернативой силовых датчиков. В литературе известны примеры применения параметров электродвигателя, таких как ток статора и ротора, скорость вращения вала двигателя, активная мощность<sup>6</sup>, с целью защиты механизма подъема от перегрузки [20].

В силу значительного отличия задач ограничения грузоподъемности и определения нагрузки на механизмы требования к первичной информации отличаются. Таким образом, в данной работе поставлена цель – определить применимость в качестве источников первичной информации текущие значения параметров электродвигателя для задачи определения реальной нагрузки, действующей на крановый механизм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На данном этапе исследования изучается применимость текущих электрических параметров электродвигателя для определения нагрузки на механизм подъема, а его результаты позволят перенести методику определения нагрузки на механизмы передвижения тележки и крана. В распоряжении авторов отсутствуют источники информации о нагрузке на механизм передвижения, альтернативных

исследуемому, что обуславливает отработку методики на механизме подъема, для которого существуют информационные источники, не связанные с исследуемым. Оснащенность лаборатории позволила произвести сопоставление значений нагрузок, полученных с помощью текущих параметров электродвигателя, массам поднимаемых грузов. Применимость такого подхода обоснована тем, что нагрузка на механизм подъема и масса поднимаемого груза линейно и прямо пропорционально связаны. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана [21]. Система управления приводами крана – релейно-контакторная. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице 1.

В силу линейной зависимости нагрузки на механизм подъема и массы поднимаемого груза возможно построить нормировочную характеристику по двум подъемам грузов различной массы. Далее производят подъем грузов других масс и оценивают отклонение вычисленных нагрузок от соответствующих значений на нормировочной характеристике. Для этого был использован наборный груз общей массой 2 т (10 x 0,2 т).

Определение электрических параметров электродвигателя механизма подъема производилось с помощью трехфазного электрического счетчика SPM 93. Измеряемые им характеристики, диапазон и точность измерения представлены в таблице 2. Счетчик устанавливается последовательно в силовую цепь питания соответствующего двигателя.

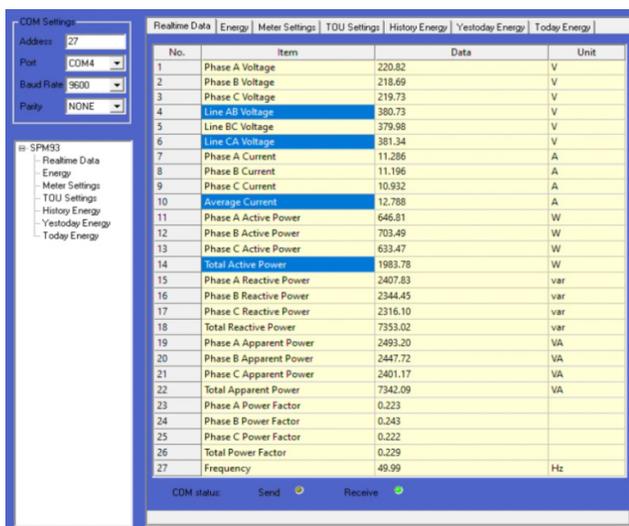
<sup>6</sup> Орлов Д. Ю., Орлов Ю. А., Однокопылов Г. И., Дементьев Ю. Н. Способ определения статического момента асинхронного двигателя для ограничения грузоподъемности крана мостового типа // Материалы Международной научно-технической конференции. Министерство образования Российской Федерации; Ивановский государственный энергетический университет; Академия технологических наук Российской Федерации; Верхне-Волжское отделение АТН РФ. 2003. 96 с.

Таблица 2  
Значимые параметры трехфазного электрического счетчика SPM 93

Table 1  
Significant parameters of SPM 93 three-phase electrical counter

Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение
Напряжение	184...276 В	0,2%	0,01 В
Ток	0...63 А	0,2%	0,001 А
Частота	47...65	0,2%	0,01 Гц
Активная мощность	0...24 кВт	0,5%	0,1 Вт
Реактивная мощность	0...24 квар	1%	0,1 вар
Коэффициент мощности	-1...+1	0,5%	0,001
Полная мощность	0...24 кВт	0,5%	0,1 ВА
Интерфейс связи		RS485	
Обновление информации		1 с	

На рисунке 1 представлена форма получаемых электрическим счетчиком SPM 93 данных и его общий вид.



а



б

Рисунок 1 – а – вид данных в программном обеспечении PILOT SPM93 Free Configuration & Monitoring Software; б – счетчик электроэнергии SPM93. Составлено автором

Figure 1 – a – Data type in PILOT SPM93 Free Configuration & Monitoring Software; b – SPM93 Power Meter. Compiled by the author

В экспериментах оценивалась применимость следующих информационных параметров электродвигателя: ток статора, активная мощность. Полученные графики сопоставлялись с изменением напряжения перед подъемом с целью определения их устойчивости к изменению параметров питающей сети. В течение всего времени проведения эксперимента амплитуда колебаний частоты питающей

сети не превышала 0,1% от номинального значения, поэтому влияние отклонения данного параметра на точность определения нагрузки не учитывали.

Среднее значение нагрузки, определяемое по динамическому процессу установившегося движения механизма подъема, вычислялось по формуле (1):

$$x = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n} \tag{1}$$

Продолжительность динамического процесса составляла 10 с. Таким образом, расчет средних значений исследуемых параметров с учетом периода обновления информации (см. таблицу 2) проводился по 10 измерениям.

Ошибка определения среднего в экспериментах с учетом точности счетчика SPM93 определялась по формуле (2) [22]:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}\right)^2 + \Delta_{сч}^2} \tag{2}$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение выборки;

$n$  – число измерений;

$\Delta_{сч}$  – ошибка определения параметра счетчиком.

Коэффициент пропорциональности активной мощности (тока статора) нагрузке на механизм определяли по формуле (3):

$$k = \frac{\Delta A(\Delta I)}{\Delta m} \tag{3}$$

где  $\Delta A(\Delta I)$  – приращение активной мощности (тока статора), соответствующее приращению  $\Delta m$  массы поднимаемого груза.

Определение массы поднимаемых грузов  $m_i$  на основе изучаемых информационных параметров производилось по формуле (4):

$$m_i = m_0 + \frac{A_i(I_i) - A_0(I_0)}{k} \tag{4}$$

где  $m_0$  – масса известного груза;

$A_i(I_i)$  – значение активной мощности (тока статора) при подъеме груза массой  $m_i$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

По записанным с помощью SPM 93 электрическим характеристикам посчитаны средние значения тока статора и активной мощности (1) при подъеме грузов соответствующих масс  $m_{гр}$  (таблица 3). Знаком «н» обозначены точки, используемые для построения нормировочной характеристики, и ошибка определения нагрузки в них не определялась. По активной мощности и току статора по (4) рассчитаны массы поднимаемых грузов  $m_{выч}$ .

Далее по двум точкам (0,2 т и 1,8 т) была построена нормировочная характеристика соответствия текущего параметра электродвигателя массе поднимаемого груза. К точкам, по которым строится нормировочная характеристика, предъявлялись два требования: точки должны соответствовать подъемам грузов с наибольшей разностью масс; изменение напряжения питающей сети в этих точках должно оказывать наименьшее воздействие на измерение (близость напряжения к медианному значению за всё время проведения эксперимента).

По (2) вычислены максимальные для серии экспериментов ошибки определения параметров тока статора и активной мощности, полученные при массе груза 0,8 т (таблица 4).

Таблица 3  
Ошибка определения массы груза по току статора и активной мощности

Table 3  
Error in determination of load mass by stator current and active power

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{перед}, В$	380,5	379	380	381,1	<b>372,4</b>	379,7	379,9	380,6	380,6	379,5	<b>372</b>
	по току статора										
$m_{гр}, кг$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{выч}, кг$	430	200	368	542	-41	695	1014	1241	1530	1800	1534
$\Delta, \%$	-	н	8,1	9,7	<b>105</b>	30,5	15,5	11,33	4,4	н	<b>23,3</b>
	по активной мощности										
$m_{гр}, кг$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{выч}, кг$	3	200	393	592	739	996	1214	1423	1605	1800	1940
$\Delta, \%$	-	н	1,7	1,4	<b>7,6</b>	0,4	1,2	1,6	0,4	н	<b>3</b>

Таблица 4  
Максимальная ошибка определения тока статора и активной мощности

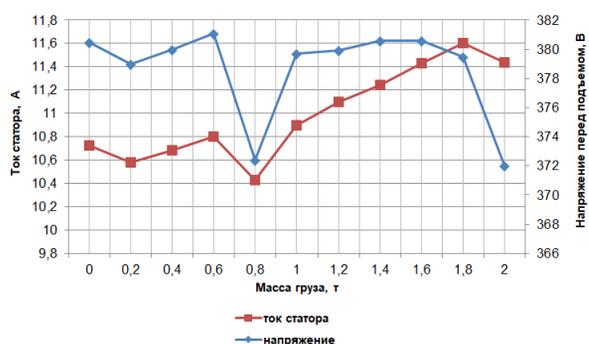
Table 4  
Error determining stator current and active power

Параметр	$\sigma$	$n$	$\Delta_{сч}$	$\Delta$
Ток статора	0,034 А	10	0,02 А; (0,2%)	0,024 А (0,24%)
Активная мощность	25 Вт	10	20 Вт; (0,5%)	32 Вт (0,8%)

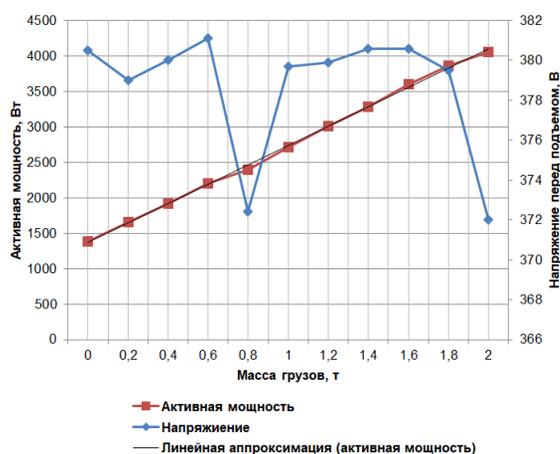
Таблица 5  
Ошибка определения нагрузки в зависимости от величины колебания напряжения

Table 5  
Error determining the load in relation to voltage fluctuation

	Ток статора	Активная мощность
	$\Delta U = 1,1 \text{ В}$	
$\Delta_{max}, \%$	30,5	1,7
$\Delta_{\varphi}, \%$	13,3	1,2
$\Delta U = 9,1 \text{ В}$		
$\Delta_{max}, \%$	105	7,6
$\Delta_{\varphi}, \%$	42,8	5,3



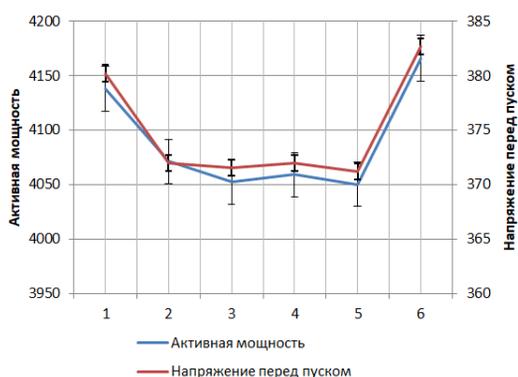
а



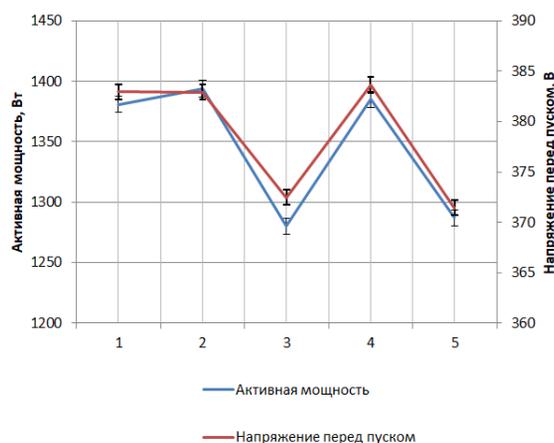
б

Рисунок 2 – а – график зависимости тока статора от массы поднимаемого груза (с напряжением питающей сети перед началом подъема); б – график зависимости активной мощности от массы поднимаемого груза (с напряжением питающей сети перед началом подъема).  
Составлено автором

Figure 2 – а – a graph of the dependency of the stator current on the mass of the cargo to be lifted (with the voltage of the supply network before the start of the lift); б – a graph of the dependency of the active power on the mass of the cargo to be lifted (with the voltage of the supply network before the start of the lift).  
Compiled by the author



а



б

Рисунок 3 – Активная мощность (с ошибкой определения активной мощности и напряжения) при изменении напряжения питающей сети: а – при = 2 т; б) при = 0 т. Составлено автором

Figure 3 – Active power (error in determination of active power and voltage) at change of supply voltage: a – at = 2 tonnes; b – at = 0 tonnes. Compiled by the author

Ошибки определения массы груза по току статора и активной мощности в зависимости от отклонения напряжения питающей сети представлены в таблице 5. Значения тока статора и активной мощности при массах груза 0,8 т и 2 т нельзя считать промахами, так как во время данных подъемов напряжения питающей сети было значительно ниже номинального. Этот факт определяет невозможность достоверного вычисления массы груза на основе непосредственного измерения исследуемых параметров и определяет необходимость включения в состав первичной информации напряжения питающей сети.

Получены графики зависимости тока статора и активной мощности от массы поднимаемого груза (рисунок 2, а, б). На графиках также представлена информация о напряжении питающей сети перед началом подъема каждого груза.

Коэффициент пропорциональности (3) активной мощности и тока статора массе поднимаемого груза составил соответственно  $k_{a.m.} = 1,34 \frac{Вт}{кг}$  и  $k_{т.с.} = 0,00064 \frac{А}{кг}$ .

Для определения влияния отклонения напряжения питающей сети от номинального значения на показания активной мощности дополнительно произвели по 6 подъемов без груза и с номинальным грузом (рисунок 3).

Первый способ корректировки заключался в умножении полученного с помощью актив-

ной мощности значения нагрузки на коэффициент  $c$  [23]:

$$c = \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \tag{5}$$

где  $U$  – напряжение перед началом подъема груза,

$U_{ном}$  – номинальное напряжение сети.

В результате анализа графиков (см. рисунок 3) было замечено, что зависимость изменения активной мощности от отклонения напряжения имеет линейный характер, а сопоставление графиков рисунка 3, а, б показало, что одинаковое падение напряжения при подъеме различных грузов приводит к одинаковому уменьшению активной мощности (т. е. отсутствует зависимость от массы поднимаемого груза). На основе выявленных закономерностей была произведена корректировка активной мощности вторым способом, заключающимся в прибавлении к вычисленной нагрузке дополнительного слагаемого, зависящего только от изменения напряжения:

$$S = \frac{A_i(U_1)}{A_i(U_2)} \cdot (U_{ном} - U), \tag{5}$$

где  $A_i(U_j)$  – значение активной мощности, полученное при подъеме  $i$ -й нагрузки и напряжении  $U_j$ .

Результаты вычислений приведены в таблице 6.

Таблица 6  
Влияние учета изменения напряжения на ошибку определения активной мощности

Table 6  
Voltage change impact on active power error

	A, Вт	U, В	k	S	m, кг	m(c), кг	m(S), кг
$m_{гр} = 0 \text{ т}$							
1	1381	382,95	0,985	-29	20	0	-9
2	1394	382,92	0,985	-29	34	13	5
3	1280	372,46	1,041	75	-71	-28	-4
4	1385	383,63	0,981	-36	47	-1	-11
5	1287	371,45	1,047	86	-73	-13	13
$\Delta_{max}$					107	41 кг	22 кг
$m_{гр} = 2 \text{ т}$							
1	4138	380,20	0,999	-1	2029	1998	2028
2	4071	371,97	1,044	60	1942	2053	2022
3	4052	371,55	1,046	63	1939	2048	2022
4	4050	371,20	1,048	66	1937	2051	2023
5	4166	382,68	0,986	-20	2017	1985	1993
$\Delta_{max}$					92 кг (4,6%)	68 кг (2,7%)	35 кг (1,4%)

Для проверки правильности выводов, полученных из анализа графиков рисунка 4, вторую корректировку применили к данным таблицы 3, таким образом оценили ее адекватность во всем диапазоне действующих на привод нагрузок (таблица 7).

Таблица 7  
Применение корректировки по напряжению

Table 7  
Application of voltage adjustment

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
по активной мощности											
$U_{перед}$ , В	380,5	379	380	381,1	372,4	379,7	379,9	380,6	380,6	379,5	372
$m_{гр}$ , кг	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$m_{выч}$ , кг	3	200	393	592	739	996	1214	1423	1605	1800	1940
$m(S)$ , кг	6	-	393	584,5	796	998	1215	1419	1600	-	2000
$\Delta$ , %	-	н	0	2,6	0,5	0,2	1,2	1,4	0	н	0

## ВЫВОДЫ

Для получения информации о нагрузке на крановые механизмы было предложено использовать значения текущих параметров соответствующего электродвигателя. В качестве таких параметров исследовались ток статора и активная мощность. Оба параметра показали линейную зависимость от массы поднимаемого груза. Однако даже при незначительном изменении напряжения питающей сети ( $\Delta U = 1,1 \text{ В}$ ) ошибка определения нагрузки по току статора составила 30,5%, а при изменении на  $\Delta U = 9,1 \text{ В}$  ошибка составила 105%. На

основе измерения активной мощности удалось достичь точности определения массы (при  $\Delta U = 1,1 \text{ В}$ ) 1,7%, и (при  $\Delta U = 9,1 \text{ В}$ ) 7,6%.

Кроме того, установлено, что одинаковое изменение массы поднимаемого груза приводит к изменению показаний активной мощности в 210 раз большим, чем тока статора. На основании представленных результатов сделан вывод о применимости активной мощности в качестве информационного параметра для определения нагрузки на механизм подъема в силу низкой восприимчивости к колебаниям напряжения питающей сети и большего по

сравнению с током статора коэффициентом пропорциональности нагрузке.

Для корректировки влияния изменения напряжения питающей сети были опробованы 2 метода. Первый метод учитывает массу поднимаемого груза, а значение поправочного коэффициента пропорционально квадрату изменения напряжения. Применение данного метода привело к уменьшению ошибки определения нагрузки в 1,7 раза.

На основе анализа экспериментальных зависимостей (рисунок 4) был разработан метод, не учитывающий массу поднимаемого груза. Поправочное слагаемое, прибавляемое к вычисленному на основе первичной информации об активной мощности значению нагрузки, прямо пропорционально изменению напряжения. Данный метод позволил для данных таблицы 6 снизить ошибку в 3,3 раза (см. таблицу 7). Таким образом, второй способ позволяет получить точность определения нагрузки в 2 раза выше, чем первый. Применение второго метода корректировки по напряжению во всем диапазоне нагрузок позволило снизить ошибку с 7,6% до 2,6% (в 2,9 раза).

Таким образом, с помощью измерения активной мощности с точностью первичной информации 0,5% по динамическому процессу подъема, определением средней нагрузки за цикл методом непосредственного осреднения и корректировки по напряжению питающей сети удалось достичь точности определения нагрузки на привод 2,6% во всем диапазоне нагрузок, что удовлетворяет требованию ГОСТ 33713–2015 (3%). Из этого следует, что на основе параметра активной мощности возможно разработать методику для определения нагрузки и на другие крановые механизмы – передвижения тележки и крана.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвичева Л. Ф., Чернякова Н. А. Исследования прочности, ресурса и надежности крановых металлоконструкций: обзор и результаты // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. С. 933–955.
2. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. С. 34–40.
3. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Печёркин А. С., Красных Б. А. Расчетно-экспериментальные подходы к анализу обеспечения ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 7–15. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15
4. Пестич С. Д. Обзор регистраторов параметров кранового оборудования при строитель-

стве для предотвращения аварийных ситуаций // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education. 2019. С. 16–18.

5. Воронцов Д. С. Применение данных с регистраторов параметров работы крана с целью определения ресурса работы грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы // European Science. 2015. № 3(4). С. 10–17.

6. Яценко О. В., Омельчук М. В. Оценка технического состояния крана автомобильного стрелового КС-45-717-1, эксплуатирующегося в условиях Крайнего Севера // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке. 2018. С. 391–399.

7. Эпов Д. А. Использование приборов и устройств безопасности на подъемных сооружениях // Вестник современных исследований. 2021. № 3–5 (41). С. 12–15.

8. Горелов В. Н. Опыт применения данных регистратора параметров при расследовании аварии башенного крана QTZ160 // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2019. № 4. С. 12–18.

9. Мокшин В. В., Якимов И. М., Кирпичников А. П., Шарнин Л. М. Разработка системы мониторинга состояния грузоподъемных механизмов // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 19. С. 75–81.

10. Алексанкин В. А., Каминский Л. С., Каминский Ф. Л., Пятницкий И. А., Федоров И. Г. Совершенствование устройств архивации и трансляции параметров работы грузоподъемных кранов // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2017. № 6. С. 42–49.

11. Каржавин В. В., Каменский С. В., Душанин И. В. Расчет крановых механизмов. Курсовой проект: учебное пособие // Екатеринбург: РГПДУ. 2017. 115 с. Режим доступа: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0634-1>.

12. Шугайло Т. С. Управление движением козлового крана с грузом заданием ускорения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. С. 154–164.

13. Корытов М. С., Щербаков В. С., Беляков В. Е. Моделирование и исследование колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 5 (69). С. 526–533.

14. Шимкович Д. Г. Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2012. № 4. С. 141–146.

15. Коган Б. И., Васильков С. А. Технологическое обеспечение качества узла встройки тензометрического датчика // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 4 (80). С. 46–53.

16. Каминский Л. С., Каминский Ф. Л., Пятницкий И. А., Федоров И. Г. Повышение эффективности использования приборов безопасности грузоподъемных кранов // Научная перспектива. 2016. № 1. С. 140–144.

17. Тимин Ю. Ф. Применение ограничителей грузоподъемности типа ОГШ в кранах мостового типа // Подъемно-транспортное дело. 2010. № 2 (57). С. 10–11.

18. Семькина И. Ю., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Исследование токов привода подъема мостовых кранов металлургических предприятий для раннего диагностирования превышения массы груза // Записки Горного института. 2021. Т. 247, № 1. С. 122–131.

19. Орлов Ю. А., Столяров Д. П., Бурков В. П. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния электромеханической системы крана мостового типа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 363–368.

20. Орлов Ю. А., Дементьев Ю. Н., Однокопылов Г. И., Орлов Д. Ю., Однокопылов И. Г., Столяров Д. П. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 4. С. 119–124.

21. Роцин В. А., Иванов С. Д., Михальчик Н. Л. Разработка и экспериментальная проверка алгоритма самонастройки ограничителя нагрузки ОГШ для кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2018. № 4. С. 514–524. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-4-514-524>

22. Иванов С. Д., Назаров А. Н., Михальчик Н. Л. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1926. 7 с. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012047

23. Попов Д. А. Исследование влияния изменения напряжения сети на потери мощности при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 145–154.

## REFERENCES

1. Moskvicheva L.F., Chernyakova N.A. Issledovaniya prochnosti, resursa i nadezhnosti kranovykh metallokonstrukcij: obzor i rezul'taty [Research on Strength, Service Life and Reliability of Crane Metal Structures: Review and Results]. *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: tekhnika i texnologii*, 2020: 933-955.

2. Klimash V.S., Sokolovskij M.A. Povyshenie energeticheskoj effektivnosti kompleksa podemnykh kranov [Improving the energy efficiency of the crane complex]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2020: 34-40.

3. Maxutov N.A., Gadenin M.M., Pechyorkin A.S., Krasnykh B.A. Raschetno-eksperimentalnye podpody k analizu obespecheniya resursa i sroka bezopasnoj ekspluatatsii promyshlennykh obektov [Calculation and experimental approaches to the analysis of ensuring the service life and safe operation period of industrial facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2020, 1: 7-15. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15

4. Pestich S.D. Obzor registratorov parametrov kranovogo oborudovaniya pri stroitelstve dlya predotvrashheniya avariynykh situacij [Review of crane equipment parameter recorders in construction to prevent accidents]. *International scientific review of the problems and prospects of modern science and education*, 2019: 16-18.

5. Voronciov D.S. Primenenie dannyh s registratorov parametrov raboty kрана s celyu opredeleniya resursa raboty gruzopodemnykh kranov s istekshim srokom sluzhby [Application of data from crane operating parameter recorders to determine the service life of cranes with expired service life]. *European Science*, 2015, 3(4): 10-17.

6. Yacenko O.V., Omel'chuk M.V. Ocenka tehničeskogo sostoyaniya kрана avtomobil'nogo strel'ovogo KS-45-717-1, ekspluatiruyushhegosya v usloviyax krajnego severa [Assessment of the technical condition of the automobile jib crane KS-45-717-1, operated in conditions of the far north]. *Severnyj morskoy put', vodnye i suxoputnye transportnye koridory kak osnova razvitiya sibir i arktiki v XXI veke*, 2018: 391-399.

7. Epov D.A. Ispol'zovanie priborov i ustrojstv bezopasnosti na podemnykh sooruzheniyah [Use of safety devices and appliances on lifting structures]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 2021, 3-5(41): 12-15.

8. Gorelov V.N. Opyt primeneniya dannyh registratora parametrov pri rassledovanii avarii bashennogo kрана QTZ160 [Experience of using parameter recorder data in the investigation of the QTZ160 tower crane accident]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, 2019, 4: 12-18.

9. Mokshin V.V., Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Sharnin L.M. Razrabotka sistemy monitoringa sostoyaniya gruzopodemnykh mexanizmov [Development of a system for monitoring the condition of lifting devices]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, .19: 75-81

10. Aleksankin V.A., Kaminskij L.S., Kaminskij F.L., Pyatniczkij I.A., Fedorov I.G. Sovershenstvovanie ustrojstv arxivatsii i translyatsii parametrov raboty gruzopodemnykh kranov [Improvement of archiving and broadcasting devices for crane operation parameters]. *Stroitel'stvo: novye texnologii - novoe oborudovanie*, 2017, no. 6, pp. 42-49.

11. Karzhavin V.V., Kamenskij S.V., Dushanin I.V. Raschet kranovy'x mexanizmov. Kursovoj proekt. Uchebnoe posobie [Calculation of crane mechanisms. Course project. Manual]. *Ekaterinburg: RGPDU*, 2017, 115. URL: <http://elar.rsvpu.ru/978-5-8050-0634-1>.

12. Shugajlo T.S. Upravlenie dvizheniem kozlovogo kрана s gruzom zadaniem uskoreniya [Gantry crane motion control with acceleration setting]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mexanika. Astronomiya*, 2020, pp. 154-164.

13. Korytov M.S., Shherbakov V.S., Belyakov V.E. Modelirovanie i issledovanie kolebanij gruzа, peremeshhaemogo gruzopodemnym kranom [Modeling and study of oscillations of cargo transported by a

crane]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 5(69): 526-533.

14. Shimkovich D.G. Dinamicheskie nagruzki pri kolebaniyax gruzha na kanate [Dynamic loads during oscillation of the load on the rope]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoj vestnik*, 2012, 4: 141-146.

15. Kogan B.I., Vasil'kov S.A. Texnologicheskoe obespechenie kachestva uzla vstrojki tenzometricheskogo datchika [Technological quality assurance of the strain gauge insertion unit]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta*, 2010, 4(80): 46-53.

16. Kaminskij L.S., Kaminskij F.L., Pyatniczkij I.A., Fedorov I.G. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya priborov bezopasnosti gruzopodyomnykh kranov [Increasing the efficiency of crane safety devices]. *Nauchnaya perspektiva*, 2016, 1: 140-144.

17. Timin Yu.F. Primenenie ogranichitelej gruzopodemnosti tipa ogsh v kranax mostovogo tipa [Use of ogsh-type load-limiters in overhead cranes]. *Podemno-transportnoe delo*, 2010, 2(57): 10-11

18. Semykina I.Yu., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Issledovanie tokov privoda podema mostovykh kranov metallurgicheskix predpriyatij dlya rannego diagnostirovaniya prevysheniya massy gruzha [Study of currents of the lifting drive of overhead cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of excess weight]. *Zapiski Gornogo instituta*, 1: 122-131.

19. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Sovershenstvovanie sistemy zashhity i kontrolya texnicheskogo sostoyaniya elektromehanicheskoj sistemy krana mostovogo tipa [Improvement of the system of protection and control of the technical condition of the electromechanical system of the bridge-type crane]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-texnicheskij zhurnal)*, 2011, 2: 363-368.

20. Orlov Yu.A., Dementev Yu.N., Odnokopylov G.I., Orlov D.Yu., Odnokopylov I.G., Stolyarov D.P. Sistema zashhity mostovogo krana na osnove monitoringa parametrov elektroprivoda mehanizma podyoma [Overhead crane protection system based on monitoring parameters of the electric drive of the hoisting mechanism]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2008, 4: 119-124

21. Roshhin V.A., Ivanov S.D., Mixal'chik N.L. Razrabotka i eksperimentalnaya proverka algoritma samonastroyki ogranichitelya nagruzki OGSh dlya kranov mostovogo tipa [Development and experimental verification of the self-tuning algorithm for the load limiter for overhead cranes]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 2018, 4: 514-524.

22. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mixal'chik N.L. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1926: 7. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012047.

23. Popov D.A. Issledovanie vliyaniya izmeneniya napryazheniya seti na poteri moshhnosti pri ispytanii asinxronnykh dvigatelej metodom vzaimnoj nagruzki [Study of the effect of changes in mains voltage on power losses when testing asynchronous motors by the method of mutual load]. *Vestnik Chuvashskogo*, 2020, 1: 145-154.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Иванов С. Д. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач.*

*Назаров А. Н. Обзор литературы, проведение экспериментов, анализ результатов.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Sergey D. Ivanov. Stating the direction of the study, formulating goals and objectives.*

*Alexander N. Nazarov. Literature review, experimentation, analysis of results.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц.*

*Назаров Александр Николаевич – аспирант.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Sergey D. Ivanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department.*

*Alexander N. Nazarov – Postgraduate student of the Hoisting and Transport Systems Department.*

УДК 62-529

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

## МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОГРЕЙДЕРА

**Р.Ю. Сухарев**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

[suharev\\_ry@mail.ru](mailto:suharev_ry@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2627-8110>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Повсеместное внедрение беспилотных технологий достаточно быстро захватывает различные отрасли промышленности и экономики. Беспилотные такси уже передвигаются по улицам городов, в том числе и в нашей стране. Внедрение беспилотных технологий в отрасль строительства, а именно в строительные машины, – это перспективное направление, которое в ближайшие несколько лет будет развиваться достаточно быстрыми темпами. Наиболее близкой по алгоритму управления к беспилотному автомобилю строительной машиной является автогрейдер. Одним из первых этапов создания беспилотного автогрейдера является построение траектории его движения. В данной работе приведены методы управления курсом беспилотной машины, которые могут быть адаптированы для управления автогрейдером.

**Материалы и методы.** Теоретические исследования были проведены на математической модели рабочего процесса автогрейдера, разработанной с использованием методологии системного анализа и представленной дифференциальными уравнениями 2-го порядка.

**Результаты.** Предложен критерий эффективности, по которому можно провести сравнение методов управления. Для оценки эффективности представленных методов проведены теоретические исследования математической модели рабочего процесса автогрейдера по предложенному критерию эффективности. Подтверждена эффективность копирного метода управления для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости автогрейдера.

**Заключение.** Предложенные методы управления могут быть использованы для создания перспективных систем автономного управления движением автогрейдера и других дорожно-строительных машин.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автогрейдер, беспилотный, траектория, машина, управление, алгоритм, метод управления, курс, чистое преследование

**Статья поступила в редакцию 14.01.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: Сухарев Р.Ю. методы управления курсом движения беспилотного автогрейдера // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 48-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

© Сухарев Р.Ю., 2022

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>  
Original article

## METHODS OF CONTROLLING THE COURSE FOR AN SELF-DRIVING GRADER

**Roman Yu. Sukharev**

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),  
Omsk, Russia  
[suharev\\_ry@mail.ru](mailto:suharev_ry@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2627-8110>

### ABSTRACT

**Introduction.** The widespread introduction of unmanned technologies quickly captures various industries and economies. Unmanned taxis are already moving through the streets of cities, including in our country. The introduction of unmanned technologies in the construction industry, namely in construction machines is a promising direction that will develop quite rapidly in the next few years. The construction machine closest in terms of control algorithm to an unmanned vehicle is an auto grader. One of the first stages of creating an unmanned grader is the construction of its trajectory. This paper presents methods for controlling the course of an unmanned vehicle, which can be adapted to control the grader.

**Materials and methods.** Theoretical studies were carried out on a mathematical model of the working process of the grader, developed using the methodology of system analysis and presented by differential equations of the second order.

**Results.** An efficiency criterion is proposed by which management methods can be compared. To evaluate the effectiveness of the presented methods, theoretical studies of the mathematical model of the working process of the grader were carried out according to the proposed efficiency criterion. The effectiveness of the copier control method for various values of the base length, base coefficient and grader speed has been confirmed.

**Conclusion.** The proposed control methods can be used to create promising autonomous traffic control systems for graders and other road construction vehicles.

**KEYWORDS:** grader, unmanned, trajectory, car, control, algorithm, control method, course, pure pursuit

**The article was submitted 14.01.2022; approved after reviewing 16.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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:* Sukharev R.Yu. Methods of controlling the course for an self-driving grader. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 48-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60>

© Sukharev R.Y., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Основная задача подсистемы управления движением беспилотной машины – следовать заданному пути, представленному массивом точек, соединенных отрезками линий. Для решения этой проблемы разработано множество различных методов, в основном для небольших двухколесных роботов или автомобилей. Для низкоскоростных машин применимы более простые стратегии управления, в которых возможны допущения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача навигации автогрейдера может быть разделена на глобальную и локальную. Глобальная – это построение траектории до начала работы по данным 3D-проекта и цифровой карты местности. Локальная – это навигация в процессе движения и изменение траектории при возникновении непредвиденных препятствий<sup>1</sup> [1, 2, 3, 5, 6, 9, 13].

Метод управления движением по маршруту должен учитывать не только положение целевой точки траектории, но и гарантировать, что автогрейдер достигнет ее с правильной ориентацией и углом поворота (в отношении ориентации и кривизны траектории в точке обзора)<sup>2</sup> [1, 2, 3, 4, 6, 9, 13].

Устройство управления курсом движения является подсистемой с двумя входами и двумя выходами векторов параметров [11].

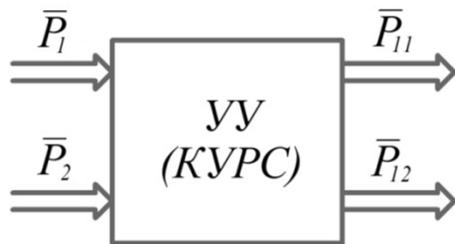


Рисунок 1 – Блок-схема устройства управления курсом.  
Составлено автором

Figure 1 – Block diagram of the course control device.  
Compiled by the author

Вектор  $\bar{P}_1$  является вектором состояния машины (в т. ч. его рабочего оборудования). Вектор  $\bar{P}_2$  является заданной траекторией движения машины в виде массива путе-

вых точек или непрерывной траектории вида  $Y = f(X)$ . Вектор  $\bar{P}_{11}$  является управляющим сигналом на рулевое управление, содержащим в себе сигналы  $\alpha_K$  и  $\alpha_P$  (в зависимости от конкретного типа рулевого управления автогрейдера). Вектор  $\bar{P}_{12}$  является управляющим воздействием на силовую установку и трансмиссию автогрейдера и формирует скорость машины  $V_{ЗД}$ .

Как было рассмотрено ранее, траектория движения автогрейдера представляет собой массив путевых точек, которые он должен проходить в строго определенном порядке. Помимо координат, путевая точка содержит в себе информацию о курсе, на который должен встать автогрейдер после достижения данной точки [11].

Постановка задачи: автогрейдер находится в точке  $A_i(x_i, y_i)$ , необходимо привести центр задней оси в точку  $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ . В таком случае возможно применение нескольких различных методов управления [11].

### Управление по одной путевой точке

Данный метод широко применяется для управления движением судов и самолетов. Расчетная схема движения автогрейдера представлена на рисунке 2 [16].

Доступными для измерения и вычисления параметрами при таком способе являются: угол поворота передних колес  $\alpha_K$ , угол между продольной осью машины и направлением на опорную точку  $\varphi_{A_{i+1}}$ , курсовой угол  $\varphi_K$ , заданный курсовой угол  $\varphi_{K,зад}$ , расстояние до опорной точки  $S_i$ . Управляемым параметром является угол поворота передних колес  $\alpha_K$  [16].

Угол между продольной осью машины и направлением на путевую точку можно вычислить по формуле

$$\varphi_{A_{i+1}} = \varphi_{K,зад} - \varphi_K. \quad (1)$$

Целевая функция управления при таком способе будет иметь вид

$$\varphi_{A_{i+1}} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Данный метод управления имеет существенный недостаток: при наличии бокового увода траектория машины будет отличаться от прямой линии, т. е. машина не будет возвращаться на прежнюю траекторию [16].

<sup>1</sup> Калоев А. В. Основы проектирования системы автоматического вождения самоходных машин. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

<sup>2</sup> Там же

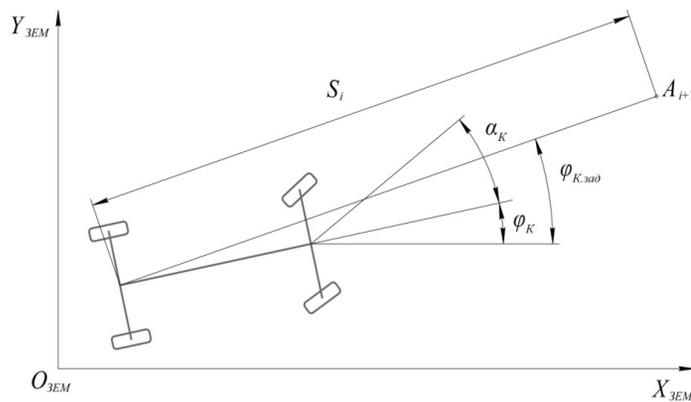


Рисунок 2 – Расчетная схема движения автогрейдера.  
Составлено автором

Figure 2 – Grader flow chart.  
Compiled by the author

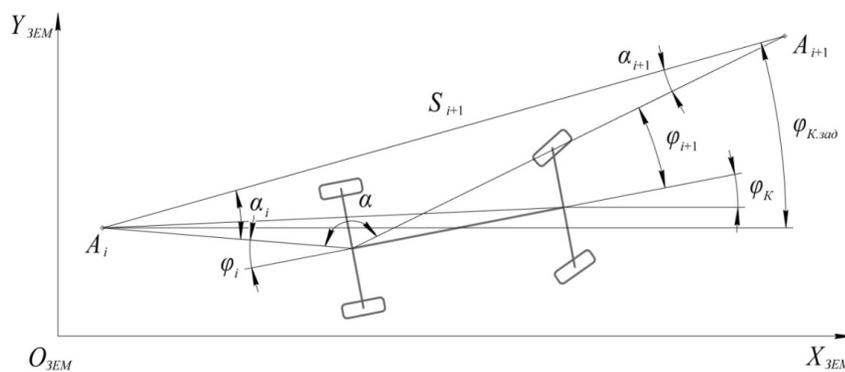


Рисунок 3 – Расчетная схема движения автогрейдера.  
Составлено автором

Figure 3 – Motor grader flow diagram.  
Compiled by the author

**Управление по двум путевым точкам**

В данном методе учитывается движение машины между двумя соседними путевыми точками. Расчетная схема представлена на рисунке 3 [16].

Измерены в данном случае могут быть: курсовой угол  $\varphi_K$ , заданный курсовой угол  $\varphi_{K,зад}$ , углы  $\alpha$ ,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_{i+1}$ , расстояние между точками  $S_{i+1}$ , углы между направлениями на следующую  $\varphi_{i+1}$  и предыдущую  $\varphi_i$  опорные точки [16].

Если углы  $\varphi_K$  и  $\varphi_{K,зад}$  являются абсолютными, т. е. отсчитываются от оси  $O_{ЗЕМ} X_{ЗЕМ}$ , то возможно определить расположение автогрейдера относительно траектории. Если  $\varphi_K < (\varphi_K + \varphi_{i+1})$ , то траектория находится слева от автогрейдера и поворачивать нужно налево [16].

Целевая функция управления в данном методе управления будет иметь вид

$$\alpha \rightarrow 180^\circ. \quad (2)$$

**Управление по непрерывной траектории**

Данный метод управления предполагает задание фиксированной траектории на местности в формате  $Y = f(X)$ .

Существует несколько методов управления по непрерывной траектории: копирный метод, чистое преследование, метод Стэнли.

**Копирный метод**

Точка копирования – это точка, которую УУ курсом стремится совместить с траекторией. В качестве копирной точки можно использовать центр масс машины, центр переднего моста, центр рабочего органа (РО) или сразу несколько точек. Можно использовать точку, находящуюся вне машины, например на удалении по продольной оси перед машиной. Как правило, она находится на продольной оси машины [16].

Задача управления сводится к совмещению положения копирной точки машины и

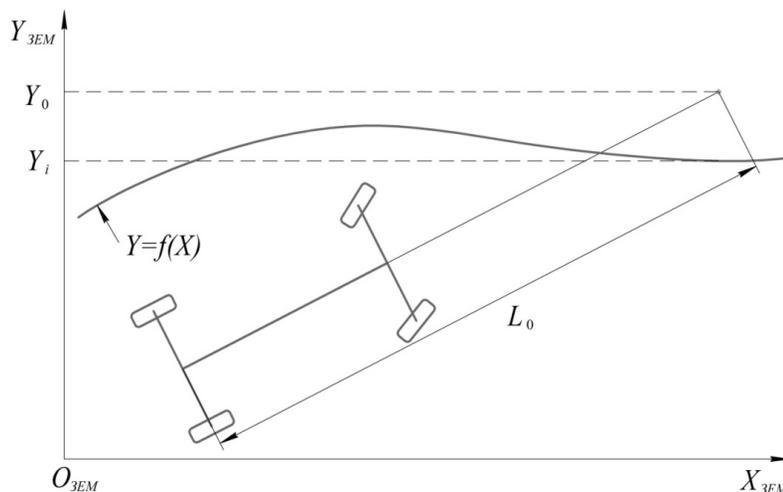


Рисунок 4 – Расчетная схема движения автогрейдера.  
Составлено автором

Figure 4 – Grader flow diagram.  
Compiled by the author

траектории. Информационным параметром в данном случае является линейное отклонение копирной точки машины  $\Delta Y$  [16].

Расчетная схема метода представлена на рисунке 4.

Метод управления будет основываться на отклонении копирной точки

$$\Delta Y = Y_0 - Y_i. \quad (4)$$

Целевая функция управления при таком методе будет иметь вид

$$\Delta Y \rightarrow 0. \quad (5)$$

**Метод управления чистое преследование (Pure Pursuit)**

Метод чистого преследования и его разновидности являются одними из наиболее распространенных подходов к проблеме управления курсом движения мобильных роботов. Метод чистого преследования состоит из геометрического расчета радиуса дуги окружности, которая соединяет местоположение задней оси с целевой точкой на траектории впереди машины. Целевая точка определяется исходя из дальности видимости  $L_0$  от центральной точки задней оси до траектории [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

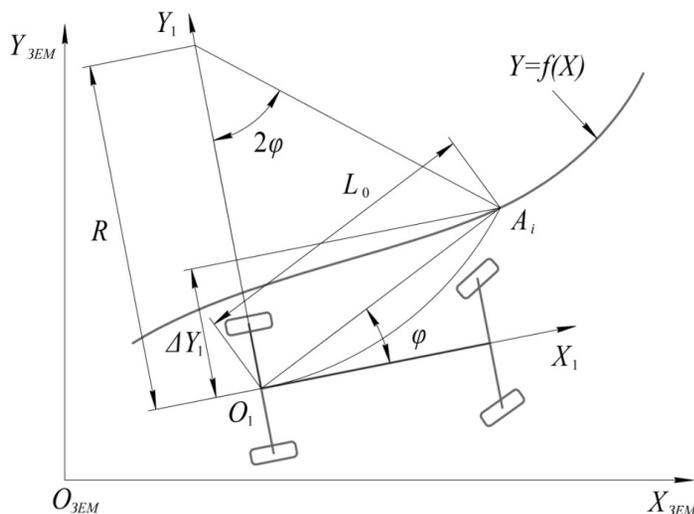


Рисунок 5 – Расчетная схема метода чистое преследование.  
Составлено автором

Figure 5 – Net pursuit design.  
Compiled by the author

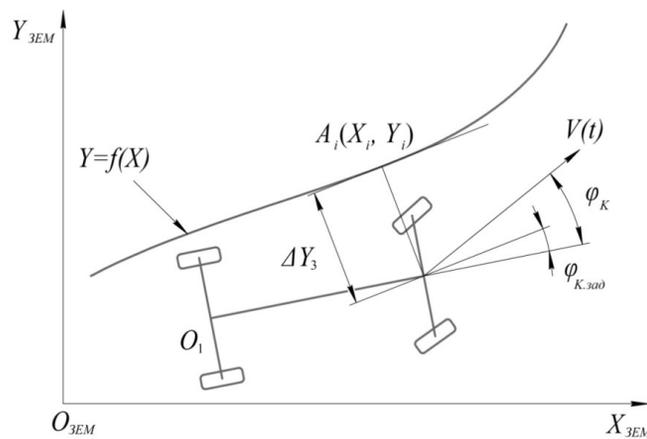


Рисунок 6 – Расчетная схема метода Стэнли.  
Составлено автором

Figure 6 – Stanley method design diagram.  
Compiled by the author

Угол поворота автогрейдера может быть определен с использованием только местоположения целевой точки и угла  $\varphi$  между вектором курса машины и вектором прогнозирования. Из рисунка 5 можно записать [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]:

$$\frac{L_0}{\sin 2\varphi} = \frac{R}{\sin(90 - \varphi)}; \quad (6)$$

$$R = \frac{L_0}{2 \sin \varphi} = \frac{L_0^2}{2 \Delta Y_1}. \quad (7)$$

Необходимый угол поворота автогрейдера можно вычислить, используя соответствующие уравнения для конкретного типа автогрейдера. Например, для автогрейдера с передними поворотными колесами<sup>3, 4, 5</sup> [14, 18, 19, 21, 24]:

$$\frac{L_0^2}{2 \Delta Y_1} = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha_K}. \quad (8)$$

Угол поворота передних колес будет равен

$$\alpha_K = \arctan\left(\frac{2 \Delta Y_1 L}{L_0^2}\right) = \arctan(K_{PP} \Delta Y_1). \quad (9)$$

Таким образом, метод чистого преследования является пропорциональным регулятором по ошибке поперечного смещения автогрейдера. Параметром настройки регулятора будет коэффициент  $K_{PP}$ .

#### Метод Стэнли

Метод Стэнли – это метод отслеживания пути, использованный в автомобиле Стэнли (Stanley) Стэнфордского университета на соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge. Метод Стэнли представляет собой нелинейную функцию обратной связи поперечной ошибки  $\Delta Y_3$ , измеренной от центра передней оси до ближайшей точки пути  $A_i(X_i, Y_i)$ , для которой может быть показана экспоненциальная сходимости [12].

На рисунке 6 показана расчетная схема метода. Взаимное расположение точки управления с управляемыми передними колесами

<sup>3</sup> Горбов, И. А. Планирование траектории движения транспортного средства при обходе препятствия / И. А. Горбов, А. В. Леонард // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2016) : сборник трудов конференции, Москва, 07–09 декабря 2016 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2017. С. 236–239.

<sup>4</sup> Портнова А. А., Котыкин С. В. Вывод аналитической зависимости радиуса поворота от угла поворота передних управляемых колес автогрейдера / Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации. Омск: СибАДИ, 2016. С. 472–476.

<sup>5</sup> Калоев А. В. Основы проектирования системы автоматического вождения самоходных машин. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

позволяет получить интуитивно понятный закон управления, где первый член просто удерживает колеса выровненными по заданной траектории, устанавливая курсовой угол  $\varphi_K$  равным углу касательной  $\varphi_{K,зад}$  к траектории в точке  $A_i(X_i, Y_i)$  [12].

Когда  $\Delta Y_3$  не равно нулю, второй член регулирует  $\varphi_K$  таким образом, чтобы предполагаемая траектория пересекала касательную к траектории. Закон рулевого управления при данном методе имеет вид [12]:

$$\varphi_K = \varphi_{K,зад} + \arctan\left(\frac{k \cdot \Delta Y_3(t)}{V(t)}\right), \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент усиления.

По мере увеличения  $\Delta Y_3$  колеса все больше будут поворачиваться в сторону траектории.

#### Критерий эффективности

Управление беспилотным автогрейдером отличается от управления беспилотным автомобилем главным образом целью. Основная цель движения автогрейдера – это перемещение рабочего органа в соответствии с проектом земляного сооружения. Траектории движения базовой машины и ее частей в данном случае вторичны, поэтому в качестве критерия эффективности выбранного метода управления следует использовать отклонение центральной точки РО от траектории [22].

Количественно такой параметр можно оценить с помощью интегрального показателя, т. е. площади между заданной траекторией и траекторией движения центральной точки РО:

$$E_T = \int_0^{\infty} |\Delta x(t)| dt, \quad (11)$$

где  $\Delta x = x(\infty) - x(t)$  – отклонение траектории движения центральной точки РО от значения  $x(\infty)$ , которое соответствует заданной траектории.

Критерий  $E_T$  геометрически представляет собой заштрихованную площадь на рисунке 7. Переходный процесс, показанный на рисунке 7, а, вызван возмущением, например ступенчатым изменением заданной траектории. Чем меньше заштрихованная площадь, тем предпочтительнее переходный процесс.

Этот интегральный критерий качества может быть использован не только для оценки качества траектории, но и при синтезе САУ

для оптимизации варьируемых параметров. Абсолютное значение критерия  $E_T$  при этом не так важно. Используя готовые выражения для  $E_T$  и передаточные функции системы, можно получить зависимости критерия  $E_T$  от варьируемых параметров системы управления и найти их оптимальные значения.

Интегральный критерий  $E_T$  можно применять к системам, у которых переходные процессы обладают колебательностью и меняют знак (рисунок 7, б).

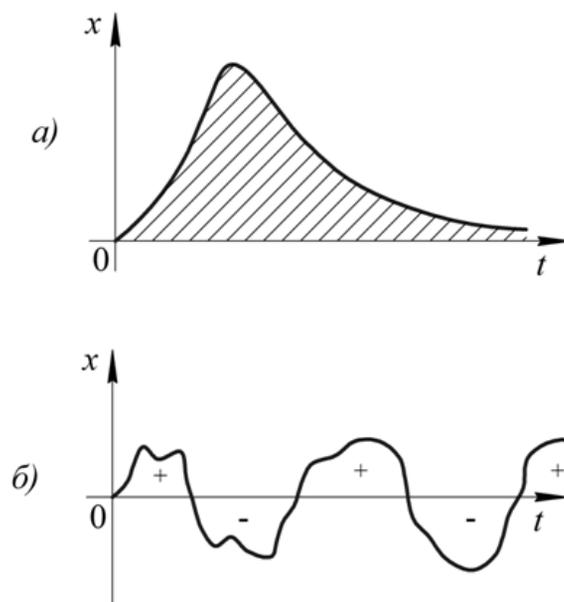


Рисунок 7 – Интегральные критерии качества.  
Составлено автором

Figure 7 – Integrated quality criteria.  
Compiled by the author

Можно использовать и более сложные интегральные критерии качества, основанные на второй и следующих производных от  $\Delta x$ . Их применение приблизит переходные процессы к кривым второго и более высоких порядков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретические исследования были проведены на математической модели рабочего процесса автогрейдера, разработанной с использованием методологии системного анализа и представленной дифференциальными уравнениями 2-го порядка. Блок-схема математической модели представлена на рисунке 8.

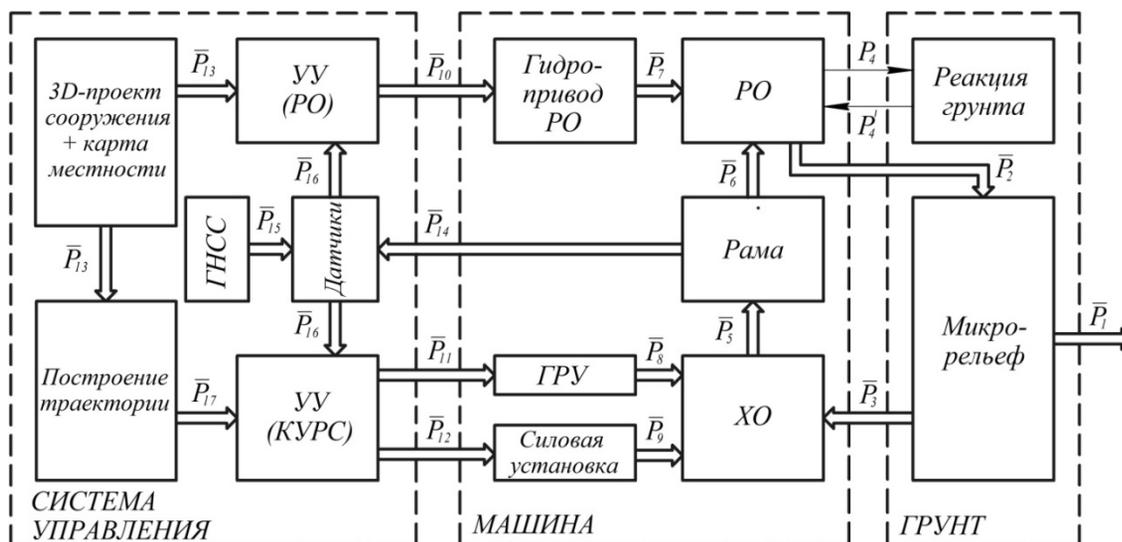


Рисунок 8 – Блок-схема математической модели рабочего процесса автогрейдера. Составлено автором

Figure 8 – Flow chart of the mathematical model of the autograder working process. Compiled by the author

Для проведения теоретических исследований необходимо было учесть основные конструктивные параметры, влияющие на движение автогрейдера по траектории, – длина базы и коэффициент баз. Так как в отличие от автомобиля при движении автогрейдера наиболее значимой точкой является центральная точка РО, то необходимо обеспечить именно правильное движение РО, а траектории колес уже вторичны<sup>6, 7</sup> [11].

Расположение РО относительно передней и задней оси автогрейдера характеризуется показателем коэффициента базы<sup>8, 9</sup>:

$$K_{\phi} = \frac{L_1}{L}, \quad (11)$$

где  $L$  – длина базы автогрейдера,  $L_1$  – расстояние от передней оси до РО.

Проведенные исследования методов чистого преследования и Стэнли показали, что очень важным фактором, влияющим на точность движения автогрейдера по заданной

траектории, является скорость поступательного движения автогрейдера ( $V$ ). Согласно техническим характеристикам большинство современных автогрейдеров во время рабочего цикла развивают скорость до 6–8 км/ч. В эксперименте скорость изменялась в пределах от 0,5 до 2,5 м/с, что соответствует 1,8 и 9 км/ч.

Варьируемые параметры при исследовании методов управления были разделены на три подгруппы:

1. Конструктивные параметры (длина базы, коэффициент базы).
2. Эксплуатационные параметры (скорость машины).
3. Параметры методов управления.

Полученные результаты были оформлены в виде комплекса поверхностей для различных длин базы, коэффициентов базы и разных значений скорости. Результаты сравнения по критерию эффективности представлены на рисунках 9–13 (1 – метод Стэнли, 2 – метод чистого преследования, 3 – копирный метод).

<sup>6</sup> Щербаков В. С., Сухарев Р. Ю., Корытов М. С. Развитие теории оптимального управления дорожными и строительными машинами на основе систем спутниковой навигации: монография. Омск : СибАДИ, 2017. 155 с. ISBN 978-5-93204-929-7.

<sup>7</sup> Щербаков В.С., Портнова А.А., Сухарев Р.Ю. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой: монография. Омск: СибАДИ. 2016. ISBN 978-5-93204-971-6.

<sup>8</sup> Там же

<sup>9</sup> Там же

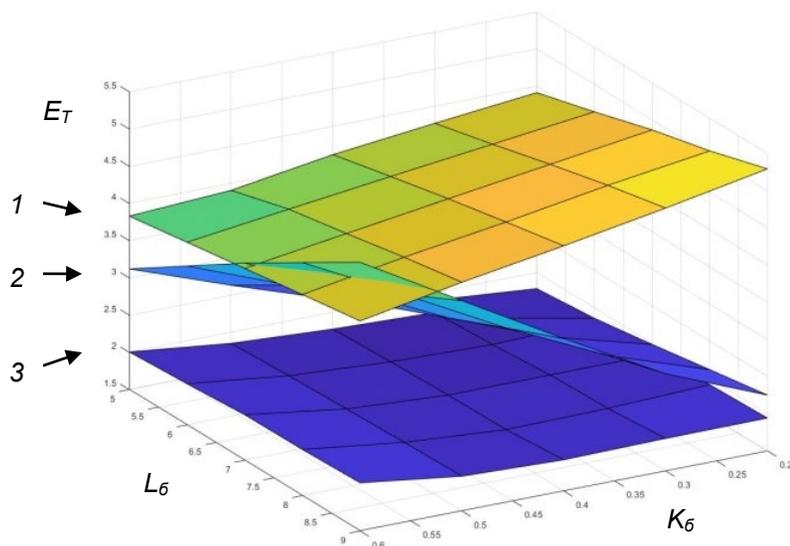


Рисунок 9 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы  $L_b$  и коэффициента базы  $K_b$  ( $V = 0,5$  м/с). Составлено автором

Figure 9 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of  $L_b$  base and  $K_b$  coefficient ( $V = 0.5$  m/s). Compiled by the author

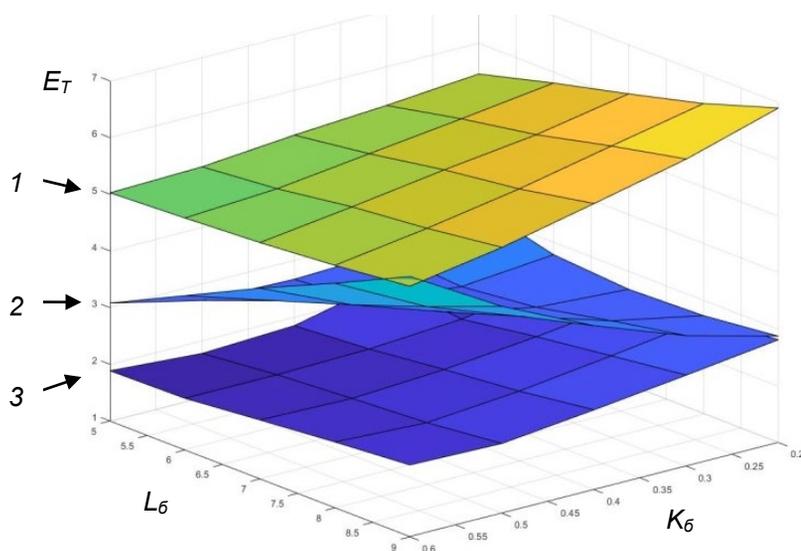


Рисунок 10 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы  $L_b$  и коэффициента базы  $K_b$  ( $V = 1$  м/с). Составлено автором

Figure 10 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of  $L_b$  base and  $K_b$  coefficient ( $V = 1$  m/s). Compiled by the author

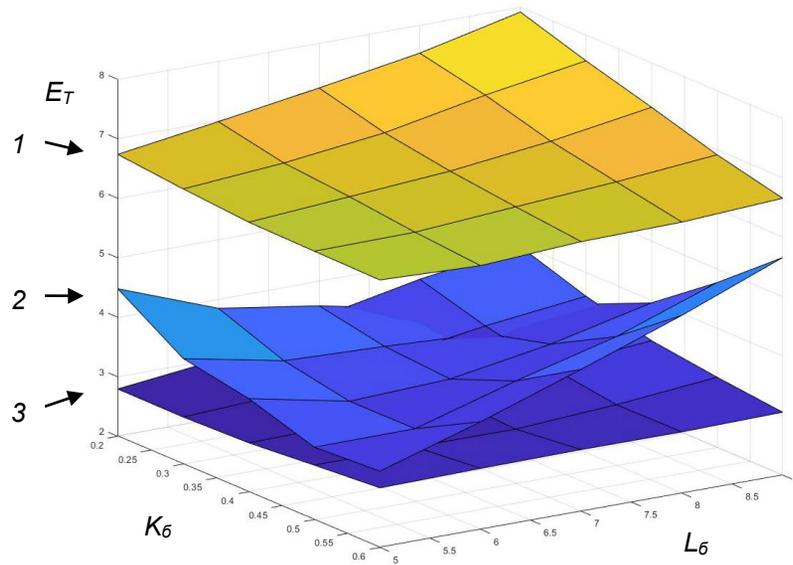


Рисунок 11 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы  $L_b$  и коэффициента базы  $K_b$  ( $V = 1,5$  м/с). Составлено автором

Figure 11 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods on the length of  $L_b$  base and  $K_b$  coefficient ( $V = 1.5$  m/s). Compiled by the author

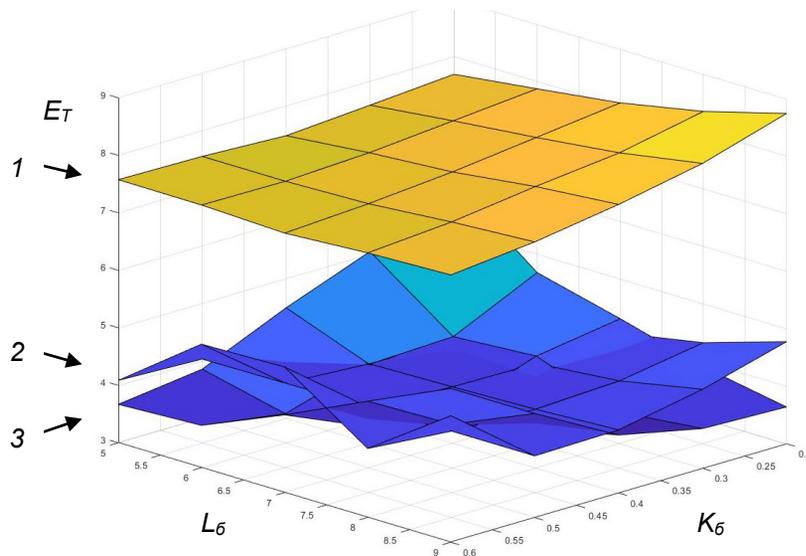


Рисунок 12 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы  $L_b$  и коэффициента базы  $K_b$  ( $V = 2$  м/с). Составлено автором

Figure 12 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods by length of  $L_b$  base and  $K_b$  coefficient ( $V = 2$  m/s). Compiled by the author

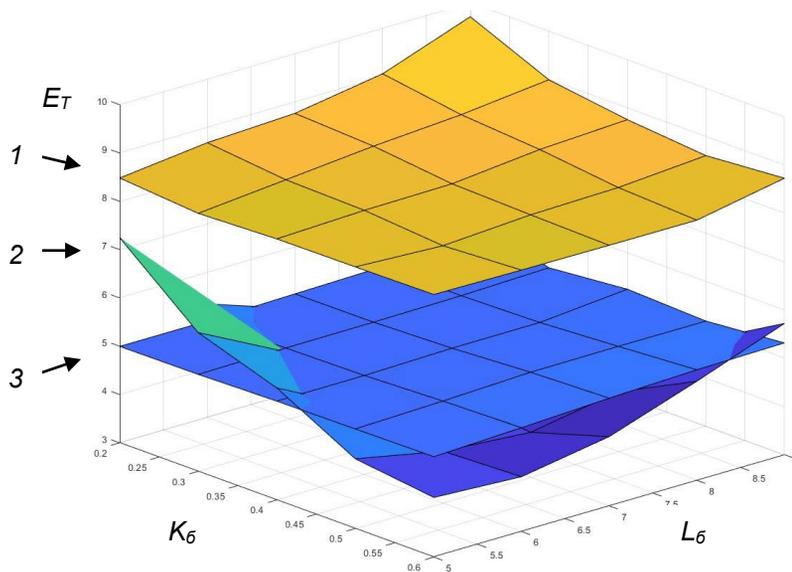


Рисунок 13 – Зависимости интегрального критерия качества различных методов управления от длины базы  $L_b$  и коэффициента базы  $K_b$  ( $V = 2,5$  м/с). Составлено автором

Figure 13 – Dependencies of the integral quality criterion of the various control methods by length of  $L_b$  base and  $K_b$  coefficient ( $V = 2.5$  m/s). Compiled by the author

Из представленных зависимостей можно сделать вывод о наибольшей эффективности копирного метода управления на всех скоростях движения.

## ВЫВОДЫ

В статье приведены методы управления курсом движения беспилотной машины, составлены расчетные схемы и целевые функции управления. Предложен критерий эффективности, по которому можно провести сравнение методов и выбор наиболее эффективного. Для оценки эффективности представленных методов проведены теоретические исследования математической модели рабочего процесса автогрейдера по предложенному критерию эффективности. Подтверждена эффективность копирного метода управления для различных значений длины базы, коэффициента базы и скорости автогрейдера.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot. 2004.
2. Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, *Automatica*, Volume 54, 2015, Pages

292-304, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.02.012>.

3. Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer // *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158*. Pp. 416-420. DOI: 10.2991/avent-18.2018.80

5. Lapiere, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) *International Journal of Robotics Research*, 26 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790

6. Matthew J. Barton. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle. Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

7. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.

8. Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.

9. P.B. Sujit, Srikanth Saripalli, J.B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013

European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland

10. R. Craig Coulter. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.

11. R. Yu. Sukharev Trajectory Plotting Algorithm for a Self-Driving Road Grader. Journal of Physics Conference Series 2096(1):012181 DOI:10.1088/1742-6596/2096/1/012181

12. S. Thrum, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics 23 (9), 661-692. 2006.

13. Артеменко М. Н., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 4(68). С. 416–430.

14. Воскресенский Г. Г., Вербицкий Г. М. Моделирование движения автогрейдера по кривой // Ученые заметки ТОГУ. 2018. Т. 9, № 2. С. 690–698.

15. Дерюшев В. В., Косенко Е. Е., Косенко В. В. Оценка параметров безопасности автогрейдера при маневрировании в улично-дорожной сети // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 3. С. 33–38. DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

16. Нгуен Т. З., Щербаков И. А., Проталинский О. М. Построение траектории движения мобильного робота в зданиях и сооружениях // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 1(83). С. 79–81.

17. Портнова А. А. Задача минимизации радиуса поворота автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. 2014. С. 97–99.

18. Сухарев Р. Ю. Математические модели процессов поворота колесных дорожно-строительных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 3. С. 259–269. DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

19. Сухарева С. В., Сухарев Р. Ю. Обоснование интегральных критериев качества земляных работ, выполненных цепными траншейными экскаваторами // Вестник СибАДИ. 2015. № 5(45). С. 52–55.

## REFERENCES

1. Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot. 2004.

2. Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, Automatica, Volume 54, 2015, Pages 292-304, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.02.012>.

3. Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158. Pp. 416-420. DOI: 10.2991/avent-18.2018.80

5. Lapiere, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) International Journal of Robotics Research, 26 (4), pp. 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790

6. Matthew J. Barton. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle. Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

7. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.

8. Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.

9. P.B. Sujit, Srikanth Saripalli, J.B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013 European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland

10. R. Craig Coulter. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.

11. R. Yu. Sukharev Trajectory Plotting Algorithm for a Self-Driving Road Grader. Journal of Physics Conference Series 2096(1):012181 DOI:10.1088/1742-6596/2096/1/012181

12. S. Thrum, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics 23 (9), 661-692. 2006.

13. Artemenko, M. N. Trends in the development of mobile unmanned robotic complexes. experience of domestic and foreign manufacturers / M. N. Artemenko, P. A. Korchagin, I. A. Teterina // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 4(68): 416-430.

14. Voskresensky G.G., Verbitsky G.M. Modeling of grader movement along a curve / Scientific notes of TOGU. - 2018. 9(2): 690-698.

15. Deryushev V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V. Assessment of the safety parameters of the grader when maneuvering in the road network / Safety of technogenic and natural systems. 2020. 3: 33-38. DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

16. Nguyen, T. Z. creation of a trajectory of movements of a mobile robot in buildings and structures / T. H. Nguyen, I. A. Shcherbatov, O. M. Protalinski // *Mathematical methods in engineering and technology - mmtt*. 2016. 1(83): 79-81.

17. Portnov, A. A. the Problem of minimizing the turning radius grader with articulated / *Innovation, quality and service in engineering and technology*. - Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2014. - pp. 97-99.

18. Sukharev, R. Yu. Mathematical models of the processes of turning wheeled road-building machines / R. Yu. Sukharev // *Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University*. 2021. 3: 259-269. - DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

19. Sukhareva, S. V. Substantiation of integral criteria for the quality of earthworks performed by chain

trench excavators / S. V. Sukhareva, R. Yu. Sukharev // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 2015. 5(45): 52-55.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Сухарев Роман Юрьевич – канд. техн. наук, доц.*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Roman Yu. Sukharev, Cand. of Sciences, Associate Professor, the Automation of Production Processes and Electrical Engineering Department, Associate Professor.*

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



## PART II. TRANSPORT

УДК 656.11

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-62-73>

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО СПРОСА ЦЕНТРОВ МАССОВОГО ТЯГОТЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ В РАМКАХ ТЕОРИИ МАКРОСИСТЕМ

И.Е. Агуреев\*, Г.Е. Пышная, В.А. Пышный

ФГБОУ ВО «ТулГУ»,

г. Тула, Россия

[agureev-igor@yandex.ru](mailto:agureev-igor@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,

[maslennikova-galina94@yandex.ru](mailto:maslennikova-galina94@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7858-1840>,

[vladislav.pyshnyi@mail.ru](mailto:vladislav.pyshnyi@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расчет корреспонденций был описан в начале XX в. в виде гравитационной модели и производится на основании аналогии с законом всемирного тяготения. Развитием данной модели можно назвать подход Дж. Вильсона, в котором расчет корреспонденций выполняется с помощью энтропийной модели. Энтропийный подход оперирует различными вариантами выражения для энтропии макроскопической системы. При этом ее равновесие достигается при максимальном значении выбранной функции энтропии. Целью данной работы является разработка методики определения вероятностного спроса центров массового тяготения «Торговые центры» и демонстрация результатов ее применения на примере торговых центров, расположенных на территории г. Тулы. Вероятностный спрос необходим для получения так называемых «априорных вероятностей» в выражении энтропии транспортной макросистемы.

**Методы и материалы.** Для разработки методики, а также ее дальнейшего использования наиболее удобной и перспективной научной платформой является теория транспортных макросистем, являющаяся частным случаем общей теории макросистем. Разрабатываемая в трудах главным образом отечественных учёных, она позволяет выполнять различные постановки задач, характерные для транспортных систем.

**Выводы.** Методика определения вероятностного спроса центров массового тяготения «Торговые центры», заключающаяся в получении априорных вероятностей нахождения в них и их ёмкостей для решения задач о поиске равновесных распределений посетителей, была разработана с целью дальнейшего развития макроскопического подхода при изучении «Торговых центров». Основным назначением методики является использование полученных результатов в решении задач о равновесных состояниях стоков транспорта и улично-дорожной сети в рамках теории транспортных макросистем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** теория макросистем, транспортная система, центр массового тяготения, энтропийный подход

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Коллектив авторов выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования. Данная работа выполнена в рамках проекта РФФИ 19-48-710015 р\_а.

**Статья поступила в редакцию 04.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

*Для цитирования:* Агуреев И.Е. Методика определения вероятностного спроса центров массового тяготения на основе классификации в рамках теории макросистем / И.Е. Агуреев, Г.Е. Пышная, В.А. Пышный // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 62-73. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-62-73>

© Агуреев И.Е., Пышная Г.Е., Пышный В.А., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-62-73>  
Original article

## METHODOLOGY TO DETERMINE THE PROBABILISTIC DEMAND OF MASS ATTRACTION CENTERS BASED ON THE CLASSIFICATION WITHIN THE FRAMEWORK OF MACROSYSTEMS THEORY

Igor E. Agureev\*, Galina E. Pyshnaya, Vladislav A. Pyshnyi

Tula State University, Tula, Russia

[agureev-igor@yandex.ru](mailto:agureev-igor@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,

[maslennikova-galina94@yandex.ru](mailto:maslennikova-galina94@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7858-1840>,

[vladislav.pyshnyi@mail.ru](mailto:vladislav.pyshnyi@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The calculation of correspondence was described at the beginning of the 20 century in the form of a gravitational model and is based on analogy with the law of universal gravitation. The development of this model can be called J. Wilson's approach, in which correspondence calculations are performed using an entropy model. The entropy approach operates with various expressions for the entropy of a macroscopic system. At the same time, its equilibrium is achieved at the maximum value of the selected entropy function. The purpose of this work is to develop a methodology for determining the probabilistic demand of mass attraction centers - Shopping centers and to demonstrate the results of its application on the example of shopping centers located on the territory of the city of Tula. Probabilistic demand is necessary to obtain the so-called 'a priori probabilities' in the expression of the entropy of the transport macrosystem.

**Methods and Materials.** For the development of the methodology, as well as its further use, the most convenient and promising scientific platform is the theory of transport macrosystems, which is a special case of the general theory of macrosystems. Developed in the works of mainly domestic scientists, it allows you to perform various tasks specific to transport systems.

**Conclusions.** The method of determining the probabilistic demand of the mass attraction centers - Shopping centers, which consists in obtaining a priori probabilities of being in them and their capacities for solving problems of finding equilibrium distributions of visitors, was developed with the aim of further developing the macroscopic approach in the study of Shopping centers. The main purpose of the technique is to use the results obtained in solving problems about the equilibrium states of the drains of transport and the road network in the framework of the theory of transport macrosystems.

**KEYWORDS:** theory of macrosystems, transport system, center of mass gravity, entropy approach.

**ACKNOWLEDGMENTS:** The team of authors expresses gratitude to the anonymous reviewers and thanks the editors of the journal for processing the article and the opportunity to publish it. This work was carried out within the framework of the RFBR project 19-48-710015 r\_a.

The article was submitted 04.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 28.02.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Agureev I.E., Pyshnaya G.E., Pyshnyi V.A. Methodology to determine the probabilistic demand of mass attraction centers based on the classification within the framework of macrosystems theory. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 62-73. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-62-73>

© I.E. Agureev, Galina E. Pyshnaya, Vladislav A. Pyshnyi, 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование представления о передвижениях населения на данный момент складывается из четырех типов поездок: передвижения от мест жительства к местам приложения труда и обратно (так называемые трудовые корреспонденции); передвижения от мест жительства к местам культурно-бытового обслуживания (магазинам и др.) и обратно; передвижения, совершаемые между местами приложений труда (деловые поездки); передвижения, совершаемые между объектами культурно-бытового обслуживания. Имеется достаточно большое количество методик расчета трудовых корреспонденций, в классической интерпретации расчет корреспонденций был описан в начале XX в. в виде гравитационной модели и производится на основании закона тяготения [1]. Развитием данной модели можно назвать подход Дж. Вильсона<sup>1</sup>, в котором расчет корреспонденций выполняется с помощью энтропийной модели. Среди отечественных ученых стоит выделить работы В. И. Швецова, в своих исследованиях он применяет гравитационную модель с использованием различных функций тяготения для передвижений с различными целями. В качестве меры «транспортной дальности» используется цена оптимального пути между районами [2, 13], на практике данный подход был применен для формирования модели Московской агломерации. Применением энтропийного подхода в своих исследованиях занимается А. В. Гасников [3], предлагая использовать гравитационную модель для распределения макросистемы по макросостояниям. И. Е. Агуреев [4] предлагает использование общей теории транспортных макросистем Ю. С. Попкова для создания динамических моделей транспортных систем, позволяющих находить оптимальные стационарные состояния (энтропийный подход) при расщеплении потоков, в рамках предлагаемого подхода были разработаны модели г. Тулы, Тульского региона<sup>2</sup>, Душанбе, Хабаровска.

Трудовые корреспонденции составляют наибольшую часть от всех поездок в утренние часы пик, при этом в дневные часы их уровень минимален, а в вечерние часы доли кор-

респондентов равномерно распределяются между трудовыми и культурно-бытовыми. Подвижность населения с трудовыми целями (к местам приложения труда и обратно к местам проживания) определяется в соответствии с графиками работы предприятий и количеством рабочих мест с учетом допущений, что все работники не находятся в отпусках или на больничных, т. е. в каждое предприятие должно попасть количество людей, равное количеству рабочих мест. Для оценки наполняемости центров массового тяготения (ЦМТ) с культурно-бытовыми потребностями подобный подход невозможен, поскольку осуществление культурно-бытовых корреспонденций не является обязательным и носит вероятностный характер.

Каждый тип ЦМТ, привлекающих население с культурно-бытовыми целями, должен быть рассмотрен с помощью своего определенного подхода, например, для медицинских учреждений количество пациентов можно определить по количеству мест одновременного обслуживания, а для кинотеатров вместимость кинозала не может быть равнозначна количеству посетителей, являясь только параметром, ограничивающим максимальный объем потребления. Этот факт подтверждается в работах А. В. Зедгенизова [5], в своих исследованиях он подробно описывает особенности генерации корреспонденций частных случаев культурно-бытовых ЦМТ. Исходя из вышеописанного, можно выделить существующую проблему отсутствия методического описания подвижности населения с культурно-бытовыми целями для каждого типа ЦМТ.

Целью данной работы является представление методики определения вероятностного спроса ЦМТ «Торговые центры» и результатов ее применения, на примере торговых центров, расположенных на территории ГО МО г. Тулы.

В рамках работы поставлены следующие задачи:

- 1) анализ моделей расчета транспортных корреспонденций и формирование модели транспортной системы;
- 2) классификация ЦМТ;
- 3) формирование массива данных с параметрами ЦМТ «Торговые центры»;

<sup>1</sup> Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем [Текст]: пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. М.: Наука, 1978. 247 с.

<sup>2</sup> Агуреев И. Е., Пышный В. А., Митюгин В. А. Транспортная модель для обоснования принимаемых решений с целью совершенствования организации движения грузового автомобильного транспорта // сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ» (30 декабря 2020 года) / редкол.: Горохов А. А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т; Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 33–38.

4) разработка рекомендаций по применению методики;

5) расчет вероятностного спроса для региональных ТЦ г. Тулы (пример).

Существуют различные типы классификаций ЦМТ: Ю. С. Попков<sup>3</sup> разделяет все объекты на 3 городские подсистемы: градообразующая база, обслуживание и транспорт; А. П. Ромм<sup>4</sup> с позиций градостроительства разделяет ЦМТ на городские базовые функции; в соответствии с СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений<sup>5</sup> можно использовать классификацию зданий и сооружений, рекреационных территорий, объектов отдыха. Для последующего исследования примем интегрированную классификацию, в которой назначим для каждой городской базовой функции свою подсистему (градообразующую или обслуживание).

ЦМТ, посещаемые с культурно-бытовыми целями, относятся к подсистеме «обслуживание» и включают в себя городские базовые функции класса «Торговля, общепит, сфера услуг» и «Образование, здравоохранение, спорт, культура, досуг». Как говорилось ранее, каждый тип ЦМТ следует исследовать отдельно. Рассмотрим ЦМТ типа торговые центры (ТЦ) как одни из наиболее массово посещаемых объектов. Под ТЦ подразумеваются сооружения, в которых находятся торговые площади, реализующие товары различной направленности, т. е. не учитываются отдельные продовольственные магазины, например, как ТЦ не учитываются сетевые магазины, напротив, здание, в котором находятся одновременно сетевой продовольственный магазин, аптечный пункт и магазин мебели, определяется как ТЦ.

Определение количества посетителей, находящихся одновременно в ТЦ, вызывает затруднение, поскольку на торговых площадях может находиться значительное количество населения. Определение емкости ТЦ по количеству парковочных мест может значительно исказить информацию о количестве посетителей, поскольку до ТЦ население может добираться различными способами.

Также необходимо классифицировать ТЦ, поскольку различные по своей величине и месту расположения они могут иметь разный уровень привлекательности для населения и таким образом влиять на величину транспортных и пешеходных потоков. Например, ТЦ, находящийся в жилом микрорайоне, в большинстве случаев пользуется спросом только у населения, живущего в пешей доступности, а ТЦ, находящийся рядом с магистральной улицей и сетью маршрутов пассажирского транспорта, имеющий большие торговые площади и широкий спектр услуг, пользуется значительно большим спросом и привлекает население из различных городских районов.

Отсутствие точных данных о потребностях в посещении ЦМТ ТЦ населением, с учетом того что каждый тип ТЦ имеет свой характер спроса как по объему посещений, так и по радиусу охвата и интенсивности посещений по дням и часам, приводит к образованию дополнительных погрешностей при формировании матрицы корреспонденции, что негативно сказывается на определении параметров функционирования транспортной системы и её элементов. Решение данной проблемы позволит целенаправленно формировать комплексы управляющих воздействий, например, уточнение качественной матрицы корреспонденций [6] предоставит возможность определить наиболее эффективные места установки технических средств косвенного управления транспортными и пассажирскими потоками. Это существенно повлияет на эффективность функционирования интеллектуальной транспортной системы города, позволит увеличить информативность и повысить комфортабельность перевозок.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для разработки методики, а также ее дальнейшего использования наиболее удобной и перспективной научной платформой является теория транспортных макросистем, являющаяся частным случаем общей теории макросистем. Разрабатываемая в трудах главным образом отечественных учёных, она позволяет

<sup>3</sup> Развитие больших городов в условиях переходной экономики (системный подход) / В. И. Ресин, Ю. С. Попков. М. : Эдиториал УРСС, 2000. 326 с.

<sup>4</sup> Ромм А. П. Комплексная оценка и функциональное зонирование территории в градостроительном проектировании: дис. ... д-ра архитектуры: 18.00.04. Москва, 2002. 206 с.

<sup>5</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.

выполнять различные постановки задач, характерные для транспортных систем.

Для того чтобы более корректно получать и обосновывать разрабатываемую методику, воспользуемся представлением модели транспортной системы в виде<sup>6</sup>.

В наиболее общем случае транспортная система может быть выражена в виде совокупности уравнений, в соответствии с работой [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^{v_f=N_a} \Delta\tau_k; \\ V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^{v_f} n_v(t) | v \in p_\alpha\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\ G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V^*(\Delta\tau_k)) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\tilde{\Gamma}$  – граф УДС;  $\rho$  – транспортные связи;  $q$  – действующие провозные (пропускные) способности;  $t$  – непрерывное время;  $v_f = N_a$  – наибольший индекс автомобиля, соответствующий количеству транспортных средств на сети в данный момент времени;  $V_\alpha$  – общее число маршрутов (корреспонденций);  $v$  – индекс автомобиля (его постоянный идентификатор);  $n_v$  – булева переменная, которая определяется соотношением (2);  $p_\alpha$  –  $\alpha$ -й маршрут;  $\pi_v$  – уравнение транспортного процесса для  $v$ -ого автомобиля;  $\Pi(t)$  – основное уравнение транспортного процесса, характеризующее долю выполненной транспортной работы;  $\beta$  – индекс транспортного процесса;  $G_p$  – функция затрат ресурсов (расход ресурсов);  $g_v$  – удельный расход ресурса для каждого автомобиля транспортного процесса;  $H$  – информационная энтропия транспортной системы;  $G^*$  – ограничения на расход ресурсов. Звездочкой обозначено равновесное состояние.

$$n_v(t) = f(x) = \begin{cases} 1, & v \in p_\alpha \\ 0, & v \notin p_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

Предполагается, что в результате решения задачи каждый маршрут становится однознач-

но определенным, и тогда уравнения  $\pi_\beta(t)$  тоже становятся определенными.

Представленная система содержит равновесное решение  $V^*(\Delta\tau_k)$ , которое достигается в ТС к концу отрезка времени  $\Delta\tau_k$  за счет наиболее вероятного распределения транспортных средств по маршрутам (корреспонденциям), обеспечивающего выполнение ограничения по расходу ресурсов  $G(t)$  и максимизацию информационной энтропии  $H(V^*(\Delta\tau_k))$  на том же отрезке времени. Используется гипотеза о достижимости равновесия на интервале  $\Delta\tau_k$ .

Выражение для информационной энтропии зависит от способов заполнения состояний системы. Эти способы изложены в монографии<sup>7</sup> и представляют собой статистики распределения элементов по подмножествам состояний, которые широко применяются в теории элементарных частиц. Например, для Больцман-статистики данное выражение имеет вид:

$$H_B(N) = H_\sigma^B + k \sum_{j=1}^m [a_j G_j + N_j \ln a_j G_j - \ln N_j !],$$

где  $a_j$  – априорные вероятности нахождения элементов в состоянии  $j$ ;  $G_j$  – ёмкости соответствующих состояний;  $N_j$  – количество элементов в состоянии  $j$ ;  $m$  – количество подмножеств состояний.

В рассматриваемой системе уравнений отсутствуют в явном виде описания центров массового тяготения, которые в методике предполагается классифицировать по критерию величины торговых площадей. Предполагается, что такой приоритет позволяет выделять ТЦ различного типа: несмотря на то, что величина торговой площади может изменяться практически как непрерывная величина, существуют объективные границы, которые позволяют относить ТЦ к тому или иному типу. Обоснование такого предположения не выполняется в рамках данной работы, но мы считаем его достаточно оправданным. Если подобная классификация будет учтена в уравнениях (1), то потребуется в явном виде указать расщепление поездок по стратификации ТЦ, выполняемой в соответствии с указанным в классификации признаком.

Тогда указанное расщепление мы должны прежде всего отразить в множествах, к каждой отдельной задаче

<sup>6</sup> Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем [Текст]: пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. М.: Наука, 1978. 247 с.

<sup>7</sup> Развитие больших городов в условиях переходной экономики (системный подход) / В. И. Ресин, Ю. С. Попков. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 326 с.

$$\begin{aligned}
 V^1(t) &= \left\{ V_1^1; V_2^1; \dots; V_\alpha^1; \dots; V_p^1 : V_\alpha^1 = \sum_{v=1}^l n_v(t) | v \in p_\alpha \right\}; \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 V^\mu(t) &= \left\{ V_1^\mu; V_2^\mu; \dots; V_\alpha^\mu; \dots; V_p^\mu : V_\alpha^\mu = \sum_{v=1}^l n_v(t) | v \in p_\alpha \right\},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\mu$  – индекс страты.

Это означает, что мы рассматриваем отдельные множества «заполнения» состояний для тех автомобилей, которые направляются в ТЦ различного типа, и имеем собственный набор корреспонденций в каждой из формул (3). В результате суммы

$$\sum_{i=1}^{N_\mu} V_i^\mu(t) = V_1^\mu + V_2^\mu + \dots + V_{v_\mu}^\mu = S_\mu \tag{4}$$

представляют собой общее число автомобилей, направляющихся к ТЦ типа  $\mu$ , а по существу отличающиеся по цели поездок величины.

Очевидно, что для каждого расщепленного множества потребуется решение собственной равновесной задачи. Поэтому необходимо дописать ограничения

$$\begin{aligned}
 G^1(t) &= g_v^1 \otimes \Pi^1(t) \leq G^{*1}; \\
 G^\mu(t) &= g_v^\mu \otimes \Pi^\mu(t) \leq G^{*\mu};
 \end{aligned} \tag{5}$$

и условия равновесия

$$\begin{aligned}
 H^1(V^{*1}(\Delta\tau_k)) &\rightarrow \max; \\
 H^\mu(V^{*\mu}(\Delta\tau_k)) &\rightarrow \max.
 \end{aligned} \tag{6}$$

В данном случае необходим ответ на вопрос: следует ли всегда решать уравнения (3)–(6) совместно или они допускают отдельные постановки задач?

Кажется логичным, что в наборе  $S_1, S_2, \dots, S_\mu$  между отдельными компонентами должна существовать связь, так как предполагается, что использование ТЦ людьми происходит не по равномерному закону, а существует определенное распределение по стратам. Тогда необходимо решать задачу (3)–(6) в общей постановке. Для этого потребуется знание нескольких условий:

- 1) априорные вероятности нахождения потребителей в ТЦ каждой страты;
- 2) средние ёмкости таких ТЦ;
- 3) закономерности ограничений, выраженные множеством

$$\{G^{*1}; G^{*2}; \dots; G^{*\mu}; \dots\},$$

которое зависит от различных социально-экономических условий использования ТЦ в данной местности.

Таким образом, при разработке методики должны быть учтены такие данные, как:

- 1) ёмкость ТЦ (торговая площадь);
- 2) интенсивность потоков и ТЦ каждой страты, определяющая априорные вероятности.

Ниже, в расчетном примере, мы покажем, каким образом могут быть найдены априорные вероятности в предыдущей формуле, а также заданы ёмкости подмножеств состояний. При этом нами будет рассмотрен случай распределения посетителей ТЦ некоторого типа. Эти посетители уже закончили транспортный процесс ( $\pi = 1$ ) и находятся на торговой площади. Следует отметить, что смысл задачи о поиске равновесного распределения транспортных средств по корреспонденциям должен быть согласован с поиском равновесного распределения индивидов по ЦМТ. Возникает вопрос: можно ли две такие задачи считать согласованными в том смысле, что каждой корреспонденции  $\omega(i, j)$  становится в соответствие сток транспорта с номером  $j$  и его ёмкостью  $Q_j$ ?

Ответ на этот вопрос может быть сформулирован таким образом: согласование обеих задач обеспечивается за счет их решения в предлагаемой последовательности:

- 1) расчет распределения посетителей по торговым центрам и определение объемов прибытий;

- 2) расчет загрузки УДС индивидами, выполняющими поездки в ТЦ  $t$ -го типа по полученным в 1-й задаче объемам прибытий.

Отметим, что постановки этих задач могут быть выполнены на основе модели типа (1) и в данной системе не рассматриваются.

Рассмотрим разработку методики определения вероятностного спроса ЦМТ «Торговые центры» на примере ТЦ г. Тулы и проведем с ее помощью вероятностный расчёт количества посетителей для определенного временного периода, т. е. сформируем объемы спроса для рассматриваемых ЦМТ.

При разработке методики были сделаны следующие допущения:



Рисунок 1 – Посещаемость ТЦ «Макси» (статистика сервисов Яндекс)

Figure 1 – Attendance of the Maxi shopping center statistics of Yandex services

• расчет производился для одного определенного часа, в который существует максимальная потребность у населения в посещении ТЦ с различными целями. По данным сервисов Яндекс, это выходной или праздничный день с 15:00 до 16:00 (рисунок 1);

- ТЦ посещают все категории населения;
- при расчетах не учитывались:
  - 1) время работы ТЦ;
  - 2) интенсивность фактических транспортных потоков;
  - 3) неравномерность транспортной сети;
  - 4) различие в притягательности ТЦ;
  - 5) сезонность;
  - 6) внешние финансовые и социальные воздействия, которые могут снизить покупательскую активность населения;
  - 7) расщепление по типам транспортных средств, используемых для перемещения к ТЦ.

Порядок применения методики заключается в следующем:

1. Первым шагом осуществлялся сбор информации о всех возможных ТЦ (наименование, координаты мест расположения), имеющих на территории ГО МО г. Тулы с помощью поисковых запросов в сети Интернет (Яндекс и Google). Дополнительно совершались запросы в ГИС-сервисах.

2. Систематизация полученных данных. Проведенный анализ позволил сделать выводы, что в России не существует утвержденной классификации ТЦ, поэтому для классификации ТЦ использовалась европейская классификация, описанная О. В. Мезенцевой<sup>8</sup>. В качестве основного критерия классификации использовалась величина торговых площадей. Таким образом, ТЦ были разделены на 4 типа: микрорайонный, районный, окружной, региональный. Так как в методике на данный момент предполагается получение данных ЦМТ для общего случая данной классификации достаточно, но при решении более узкой задачи, например, прогнозирования транспортного спроса для оптимизации маршрутной транспортной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, допустимо расширить классификацию и включить в нее в качестве признаков наличие рядом остановочного пункта и его типа. Возможные для включения в анализ характеристики, влияющие на привлекательность ТЦ, описаны в работе Мирошниченко [7].

Подробное описание типов представлено в таблице.

<sup>8</sup> Мезенцева О. В. Оценка коммерческой недвижимости: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 115 с.

Таблица  
Классификация ТЦ

Table  
Shopping center classification

	Расположение	Аудитория	Торговая площадь	Якорный арендатор	Описание
Микрорайонный торговый центр	В удалении от центральных улиц и стратегических магистралей	До 3000 чел.	Менее 3000 кв. м	Может отсутствовать	Торговля товарами первой необходимости, услуги повседневного спроса
Районный торговый центр	В удалении от центральных улиц и стратегических магистралей, в радиусе 5–10 мин езды на личном или общественном транспорте	3000–40000 чел.	3000–10000 кв. м	Продуктовый супермаркет, аптека	Торговля продуктами питания, товарами первой необходимости, услуги повседневного спроса
Окружной торговый центр	Вблизи центральных улиц и стратегических магистралей, 10–20 мин транспортной доступности	40–150 тыс. чел.	9000–20000 кв. м	Продуктовый супермаркет, аптека, товары для детей, промтовары	Промтовары, одежда, мебель, товары для дома, места отдыха и развлечения, предприятия бытового обслуживания
Региональный торговый центр	Вблизи стратегических магистралей, 30–40 мин транспортной доступности	Свыше 150 000 чел.	30000–45000 кв. м	Несколько крупных универмагов с полным ассортиментом товаров	Промтовары, одежда, мебель, товары для дома, места отдыха и развлечения, предприятия бытового обслуживания

3. Вычисление торговых площадей. Подобная информация практически отсутствует в свободном доступе. Для уточнения данных использовался технологичный сервис для поиска недвижимости по всей России – ЦИАН, значения 70% площадей удалось найти с его помощью. Отсутствующие значения площадей вычислялись по формуле нахождения площади исходя из длины и ширины зданий на цифровой карте при максимальном приближении при помощи инструмента – масштабная линейка.

4. Нанесение меток ТЦ на интерактивную карту. В соответствии с таблицей назначены аналогичные цвета для меток, обозначив принадлежность торговых центров к той или иной группе:

- микрорайонный торговый центр – синие метки;

- районный торговый центр – зелёные метки;
- окружной торговый центр – оранжевые метки;
- региональный торговый центр – красные метки.

Так как объём информации достаточно большой, было принято решение оптимизировать процесс внесения меток на карту импортом в формате GeoJSON. Данный формат был выбран в связи с тем, что при импорте на карту добавляются метки (включающие в себя координаты, описание, подпись, номер, цвет), также есть возможность добавить линии и многоугольники. Но группы меток при данном методе не сохраняются. Тем не менее все интересующие нас параметры: цветовое различие, координаты и описание для каждой метки – в этом формате присутствуют. В описание было помещено название торгового центра, его адрес, тип и торговая площадь.

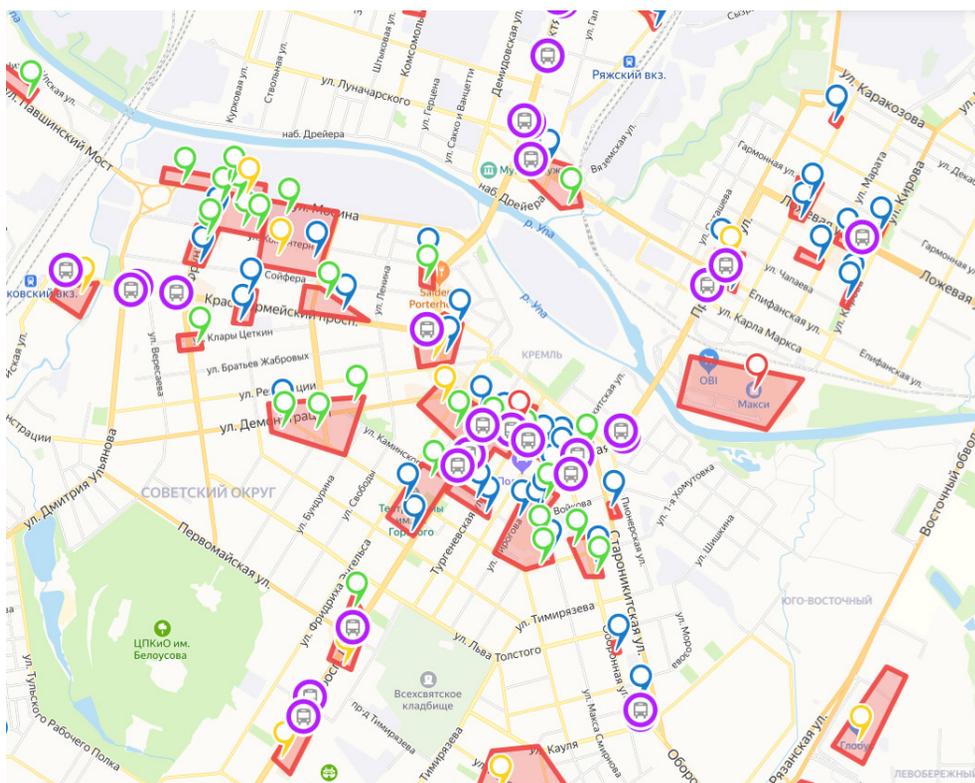


Рисунок 2 – Участок карты г. Тулы с метками ТЦ и остановочных пунктов

Figure 2 – Section of the map of Tula with marks of shopping centers and stopping points

После расчёта площади всех найденных центров получилось, что всего найдено – 148 торговых центров, из них 85 микрорайонных торговых центров, 44 районных торговых центров, 15 окружных торговых центров и 2 региональных торговых центра (рисунок 2).

На карту для последующей оценки взаимосвязи объемов пассажирообмена с местами расположения ЦМТ также нанесены метки с остановочными пунктами (см. рисунок 2), пассажирообмен которых в выходные дни составляет более 900 чел. Подобных остановочных пунктов в городе имеется 40, что составляет примерно 6% от общего числа. Данные взяты из обследования пассажирообмена остановочных пунктов г. Тулы, проведённого в 2019 г. Данные метки наносились вручную в связи с тем, что нет возможности задать иконку для метки импортом для визуального отличия.

5. Кластеризация. После нанесения всех торговых центров на карту были выделены кластеры ТЦ. Принципом выделения являлась пешая доступность менее 5 мин для больших скоплений, а также привязка к одному и тому же остановочному пункту. Выделение кластеров позволит при формировании условных транспортных районов уточнять их границы и формировать объемы транспортного спроса.

6. Расчёт вероятностного спроса (расчет априорных вероятностей и определение емкостей ЦМТ).

Расчет преследует целью продемонстрировать некоторые особенности макро моделирования и показать, каким образом могут быть получены и использованы данные о пребывании посетителей в ТЦ какого-либо уровня. Под вероятностным спросом мы будем понимать характеристику, которая дает возможность рассчитать вероятность нахождения отдельного индивида в данном ТЦ в данном интервале времени суток. Основой для такого расчета являются следующие исходные данные:

1) статистическая доля тех характерных дней, которые использовались индивидом  $k$ -ой категории для посещения ТЦ  $t$ -го типа, в общем объеме дней одного месяца (или года, в зависимости от условий задачи); обозначим эту величину  $P_{kt}$ , которая может быть определена на основе социологического опроса в виде таблицы  $K \times T$ , где  $K$  – число категорий жителей;  $T = 4$  – число типов ТЦ на основе таблицы; категория индивидов представляет собой, как вариант, тип передвижения при посещении ТЦ, тогда  $K=3$  (пешее; индивидуальный транспорт; пассажирский транспорт);

2) вероятность выбора отдельным индивидом  $k$ -й категории конкретного типа ТЦ из множества ТЦ  $t$ -го типа, которую обозначим  $p_{kt}$ ; для её определения на первом этапе расчета можно принять закон равномерного распределения вероятностей; в более общем случае потребуются вычисление на основе заданной функции плотности вероятностей или гистограммы, которые могут быть определены на основе обследований;

3) вероятность того, что индивид  $k$ -й категории выбрал для начала посещения ТЦ  $t$ -го типа  $i$ -й час времени характерных суток (дня); данная величина может быть определена с помощью диаграмм, представленных на рис. 1 и обозначена как  $p_{kti}^{(ch)}$ ;

4) величина времени, проведенного в ТЦ  $t$ -го типа индивидом  $k$ -ой категории, отнесенная к продолжительности работы данного ТЦ; на первом этапе ее можно считать независимой от времени начала посещения ТЦ; в более общем случае можно применить теорему Байеса, устанавливающую условную вероятность продолжительности посещения в зависимости от вероятности начала посещения в  $i$ -й час; данную величину обозначим как  $\delta_{ikt}$  или  $\delta_{ikt}(t_i)$ .

Тогда вероятность того, что индивид  $k$ -й категории может находиться в  $t$ -м ТЦ в час времени  $t_i$ , рассчитывается по формуле:

$$p_{kti} = P_{kt} * p_{kt} * p_{kti}^{(ch)} * \delta_{ikt}(t_i).$$

Выполним примерный расчет в соответствии с вышеописанной методикой для региональных торговых центров Тулы.

В соответствии с соцопросом, проведенным в Казани [8], каждый житель посещает ТЦ в среднем 1,6 раза; в месяце в среднем 30,5 дней, отсюда

$$P_{kt} = \frac{1,6}{30,5} \approx 0,0525.$$

Рассчитаем вероятность выбора одного из двух региональных ТЦ Тулы. Возможно также учесть величину торговых площадей региональных ТЦ, на примере Тулы: ТЦ «Макси» 107530 м<sup>2</sup>, а ТЦ «Гостиный двор» 51000 м<sup>2</sup>. В этом случае вероятность выбора наиболее крупного ТЦ равна:

$$p_{kt} = \frac{107530}{107530+51000} = 0,678.$$

В соответствии с рис.1 было выбран временной период с 15 до 16 часов, для которого  $p_{kti}^{(ch)} = 0,115$ .

В среднем по информации Business Online каждый житель проводит 3 часа в торговом центре, откуда получается

$$\delta_{ikt} = \frac{3}{24} = 0,125.$$

Таким образом:

$$p_{kti} = P_{kt} * p_{kt} * p_{kti}^{(ch)} * \delta_{ikt}(t_i) \approx 0,000512.$$

Если количество жителей города Тулы принять равным 482 873 человек, то соответственно в каждом из региональных ТЦ в часы наибольшего спроса посещения в данных ЦМТ присутствует примерно по 247 человек всех категорий. Последнюю величину следует нормировать в соответствии с долей  $k$ -ой категории в общей величине посетителей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

К результатам настоящей статьи следует отнести работу, выполненную при составлении классификации ТЦ и состоящую в анализе большого числа существующих ЦМТ данного типа. Следует отметить, что интерес представляет также соотнесение мест расположения ТЦ и остановочных пунктов, для которых известны величины пассажирообмена на основе проводившихся ранее обследований. Такой анализ может проводиться с целью определения влияния находящихся вблизи остановочных пунктов ТЦ. Разработанная методика определения вероятностного спроса состоит из 6 последовательно выполняемых пунктов, среди которых основными являются этапы кластеризации ТЦ и расчет величины вероятностного спроса на услуги ТЦ различного уровня.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье с целью дальнейшего использования макроскопического подхода при изучении ЦМТ «Торговые центры» была разработана методика определения вероятностного спроса ЦМТ «Торговые центры», заключающаяся в получении априорных вероятностей нахождения в ЦМТ и их ёмкостей для решения задач о поиске равновесных распределений посетителей в таких ЦМТ.

При этом основным назначением методики является использование полученных результатов в решении задач о равновесных состояниях стоков транспорта и УДС в рамках теории транспортных макросистем.

Дальнейшие направления исследований должны быть направлены на решение таких задач, как:

- 1) проведение социологических опросов;
- 2) обследование ЦМТ;
- 3) постановка и численное решение задач о равновесных состояниях стоков транспорта (ЦМТ) и УДС в квазидинамической постановке;
- 4) постановка и решение задач 4-шаговой модели с позиций транспортных макросистем на этапе Trip generation.

С практической точки зрения методика позволит более точно рассчитывать вектора генерации и поглощения транспортных и пешеходных потоков ЦМТ, матрицы корреспонденций, расцепление перемещений по потребностям, осуществлять построение транспортных моделей спроса, а также рассчитывать параметры функционирования городских транспортных систем, что способствует формированию целостного представления о подвижности населения городов.

Конкретизируя, можно выделить отдельные задачи, при решении которых возможно использование предложенной методики:

- определение фактических параметров функционирования транспортной системы;
- оптимизация маршрутной транспортной системы городского пассажирского транспорта общего пользования;
- разработка предложений по переносу или созданию новых остановочных пунктов;
- определение эффективности застройки новыми объектами городских территорий;
- определение эффективности строительства или реконструкции участков улично-дорожной сети, подбор наиболее рационального варианта;
- формирование грузового каркаса региона.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *J. American Instit. Planners*. 1956. 22: 94-102.
2. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации / А. С. Алиев, А. И. Стрельников, В. И. Швецов, Ю. З. Шершевский // *Автоматика и телемеханика*. 2005. № 11. С. 113–125.
3. Гасников А. В., Гасникова Е. В. О возможной динамике в модели расчёта матрицы корреспонденций (А. Дж. Вильсона) // *ТРУДЫ МФТИ*. 2010. Т. 2, № 4. С. 45–54.
4. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных систем // *Мир транспорта и технологических машин*. Орел: ГТУ. 2009. № 2. С. 3–16.
5. Бурков Д. Г., Зедгенизов А. В. Математическое описание транспортного спроса к объектам культурно-бытовой направленности // *Вестник ИрГТУ*. 2016. Т. 20, № 12. С. 201–209.
6. Жанказиев С. В. Методологические принципы построения телематической системы косвенного управления транспортными потоками // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2010. № 3. С. 48–54.
7. Мирошниченко Д. И. Анализ критериев конкурентоспособности торговых центров // *Научный вестник Волгоградского филиала РАНХиГС. Серия: Экономика*. 2015. № 3. С. 76–81.
8. Маркетинговое исследование по оценке торговых центров г. Казани [https://studbooks.net/779159/marketing/marketingovoe\\_issledovanie\\_po\\_otsenke\\_torgovyh\\_tsentrov\\_g\\_kazani](https://studbooks.net/779159/marketing/marketingovoe_issledovanie_po_otsenke_torgovyh_tsentrov_g_kazani).
9. Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы / А.С. Алиев, Д.С. Мазурин, Д. А. Максимова, В.И. Швецов // *Труды ИСА РАН*. 2015. Т.65, № 1. С. 3–15.
10. Швецов В. И. Проблемы моделирования передвижений в транспортных сетях // *ТРУДЫ МФТИ*. 2010. Том 2, №4. С. 169–179.
11. Piovani D, Arcaute E, Uchoa G, Wilson A, Batty M. 2018 Measuring accessibility using gravity and radiation models. *R. Soc. open sci.* 5: 171668. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.171668>.
12. Indriany S., Sjafruddin A., Kusumawati A., et al. Mode choice model for working trip under risk and uncertainty. *AIP Conference Proceedings* 1977, 020041 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5042897> Published Online: 26 June 2018.
13. Wan L., Jin Y. Assessment of model validation outcomes of a new recursive spatial equilibrium model for the Greater Beijing/ September 2017. *Environment and Planning B Urban Analytics and City Science* 46(2): 239980831773257. DOI:10.1177/2399808317732575.
14. Chmielewski J., Kempa J. Hexagonal Zones in Transport Demand Models. In *International Congress on Engineering. Engineering for Evolution*, KnE Engineering, pages 103–116. DOI 10.18502/keg.v5i6.7025.
15. Fox J., Patrui B. South East Wales Transport Model. Demand Model Implementation. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2018. [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR1927z3.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1927z3.html).
16. Miller E. J. Accessibility: measurement and application in transportation planning, *Transport Reviews*, 38:5, 551-555, DOI: 10.1080/01441647.2018.1492778.
17. Klinkhardt C., Woerle T., Briem L., et al. Using OpenStreetMap as a Data Source for Attractiveness in Travel Demand Models. *Transportation Research Record* 2021, 2675(8) 294–303.
18. Suprayitno H. Developing a direct gravity trip distribution model for air passenger demand. 2020 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 419 012092.
19. Naser I. H., Mahdi M. B., Meqtoof F. H., et al. Modelling Trip Distribution Using the Gravity Model and Fratar's Method. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 2021, 8(2): 230-236. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.080209>.
20. Waldrip S. H., Niven R. K., Abel M. et al. Maximum Entropy Analysis of Transport Networks. *BAYESIAN INFERENCE AND MAXIMUM ENTROPY METHODS IN SCIENCE AND ENGINEERING: Proceedings of the 36th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering (MaxEnt 2016)*. DOI:10.1063/1.4985364.

## REFERENCES

1. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *J. American Instit. Planners*. 1956. 22: 94-102.
2. Modelirovanie transportnyh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeracii / A. S. Aliev, A. I. Strel'nikov, V. I. Shvecov, Ju. Z. Shershevskij // *Avtomatika i telemekhanika*. 2005. 11: 113–125. (In Russian)
3. Gasnikov A. V., Gasnikova E. V. O vozmozhnoj dinamike v modeli raschjota matricy korrespondencij (A. Dzh. Vil'sona) // *TRUDY MFTI*. 2010. 2(4): 45–54. (In Russian)
4. Agureev I. E. Nelinejnye modeli transportnyh sistem // *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. Orel: GTU. 2009. 2: 3–16. (In Russian)
5. Burkov D. G., Zedgenizov A. V. Matematicheskoe opisanie transportnogo sprosa k ob'ektam kul'turno-bytovoj napravlenosti // *Vestnik IrGTU*. 2016. 20(12): 201–209. (In Russian)
6. Zhankaziev S. V. Metodologicheskie principy postroeniya telematicheskoy sistemy kosvennogo upravleniya transportnymi potokami // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI)*. 2010. 3: 48–54. (In Russian)
7. Miroshnichenko D.I. Analiz kriteriev konkurentosposobnosti torgovyh centrov // *Nauchnyy vestnik Volgogradskogo filiala RANHiGS. Seriya: Jekonomika*. 2015. 3: 76–81. (In Russian)
8. Marketingovoe issledovanie po ocenke torgovyh centrov g. Kazani [https://studbooks.net/779159/marketing/marketingovoe\\_issledovanie\\_po\\_otsejke\\_torgovyh\\_tsentrov\\_g\\_kazani](https://studbooks.net/779159/marketing/marketingovoe_issledovanie_po_otsejke_torgovyh_tsentrov_g_kazani).
9. Struktura kompleksnoj modeli transportnoj sistemy g. Moskvy / A.S. Aliev, D.S. Mazurin, D. A. Maksimova, V.I. Shvecov // *Trudy ISA RAN*. 2015. 65(1): 3–15. (In Russian)
10. Shvecov V. I. Problemy modelirovaniya peredvizhenij v transportnyh setjah // *TRUDY MFTI*. 2010. 2(4): 169–179. (In Russian)
11. Piovani D, Arcaute E, Uchoa G, Wilson A, Batty M. 2018 Measuring accessibility using gravity and radiation models. *R. Soc. open sci.* 5: 171668. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.171668>.
12. Indriany S., Sjafruddin A., Kusumawati A., et al. Mode choice model for working trip under risk and uncertainty. *AIP Conference Proceedings* 1977, 020041 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5042897> Published Online: 26 June 2018.
13. Wan L., Jin Y. Assessment of model validation outcomes of a new recursive spatial equilibrium model for the Greater Beijing/ September 2017. *Environment and Planning B Urban Analytics and City Science* 46(2): 239980831773257. DOI:10.1177/2399808317732575.
14. Chmielewski J., Kempa J. Hexagonal Zones in Transport Demand Models. In *International Congress on Engineering. Engineering for Evolution*, KnE Engineering, pages 103–116. DOI 10.18502/keg.v5i6.7025.
15. Fox J., Patrui B. South East Wales Transport Model. Demand Model Implementation. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2018. [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR1927z3.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1927z3.html).
16. Miller E. J. Accessibility: measurement and application in transportation planning, *Transport Reviews*, 38:5, 551-555, DOI: 10.1080/01441647.2018.1492778.
17. Klinkhardt C., Woerle T., Briem L., et al. Using OpenStreetMap as a Data Source for Attractiveness in Travel Demand Models. *Transportation Research Record* 2021, Vol. 2675(8) 294–303.
18. Suprayitno H. Developing a direct gravity trip distribution model for air passenger demand. 2020 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 419 012092.
19. Naser I. H., Mahdi M. B., Meqtoof F. H., et al. Modelling Trip Distribution Using the Gravity Model and Fratar's Method. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 2021, 8(2): 230-236. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.080209>.
20. Waldrip S. H., Niven R. K., Abel M. et al. Maximum Entropy Analysis of Transport Networks. BAYESIAN INFERENCE AND MAXIMUM ENTROPY METHODS IN SCIENCE AND ENGINEERING: Proceedings of the 36th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering (MaxEnt 2016). DOI:10.1063/1.4985364.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Агуреев И. Е. *Формулировка задач исследования, теоретические положения, модель транспортной системы.*

Пышная Г. Е. *Методика определения вероятностного спроса ЦМТ «Торговые центры», оформление, поиск и подбор источников литературы.*

Пышный В. А. *Обзор классификаций ЦМТ, анализ исследований отечественных и зарубежных авторов.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

Igor E. Agureev. *Formulation of research objectives, scientific provisions.*

Galina E. Pyshnaya. *Design, search and selection of literature sources, a method for determining the probabilistic demand of centers of mass gravitation "Shopping centers".*

Vladislav A. Pyshnyi. *A review of the classifications of the centers of mass gravitation, analysis of the studies of domestic and foreign authors.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, доц.

Пышная Галина Евгеньевна – магистрант.

Пышный Владислав Александрович – канд. техн. наук, доц.

## AUTHORS AFFILIATION

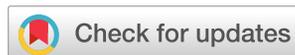
Igor E. Agureev – Dr of Sci., Associate Professor.

Galina E. Pyshnaya – Undergraduate.

Vladislav A. Pyshnyi – Cand. of Sci., Associate Professor.

УДК 656.1

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-74-83>

# ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИМ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА РАБОТНИКОВ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Л.С. Трофимова\*, А.П. Жигадло***Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
г. Омск, Россия**trofimova\_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,**ap\_zhigadlo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8883-3167>**\*ответственный автор*

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Акцент сделан на современные требования в развитии транспортной отрасли за счет совершенствования планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава, которые являются функцией от спроса на выполнение перевозок. Результаты деятельности предприятий автомобильного транспорта зависят от производительности труда каждого работника, выполняющего определенную функцию для реализации конкретного договора и получения прибыли.

**Материалы и методы.** Планирование осуществляется с применением концептуальных положений текущего планирования работы автотранспортного предприятия, учитывающего взаимосвязь видов деятельности и спрос на выполнение перевозок, методов теории вероятностей и математической статистики, научных принципов образования и подготовки работников для транспортной отрасли.

**Результаты.** Применения нового подхода к планированию заключаются в объединении производительности труда работников и выработки подвижного состава АТП. Это позволило разработать математическую модель и методику, в которых учитывается, что производительность труда работников должна обеспечить получение планового дохода по каждому договору и её величина будет планироваться в границах доверительной вероятности. При планировании учитываются вероятностные события, которые имеют место при развитии отраслей экономики РФ и влияют на потребности в профессиональных кадрах. Математическое моделирование выполняется применительно к реальным эксплуатационным условиям перевозок грузов и конкретным функциям работников. Количество подвижного состава и необходимое количество работников определяется по выработке подвижного состава, по освоению конкретной производственной функции работником в современных условиях договорных отношений.

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследования предназначены для практики работы предприятий автомобильного транспорта на этапе определения показателей производительности труда работников и подвижного состава.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** математическая модель, методика, производительность труда работников, выработка подвижного состава

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

**Статья поступила в редакцию 07.11.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.**

**Конфликт интересов отсутствует.**

© Трофимова Л.С., Жигадло А.П., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Трофимова Л.С. Планирование деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава/ Л.С. Трофимова, А.П. Жигadlo // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 74-83. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-74-83>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-74-83>

Original article

## ACTIVITIES FOR ROAD TRANSPORT ENTERPRISES ON INDICATORS OF WORKERS AND ROLLING STOCK PRODUCTIVITY PLANNING

**Liudmila S. Trofimova\***, **Aleksandr P. Zhigadlo**

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

[trofimova\\_ls@mail.ru](mailto:trofimova_ls@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,

[ap\\_zhigadlo@mail.ru](mailto:ap_zhigadlo@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8883-3167>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The emphasis is placed on modern requirements in the development of transport industry by improving the planning of the activities of road transport enterprises in terms of indicators that determine the productivity of workers and rolling stock, which are a function of the demand for transportation. The results of the activities of road transport enterprises depend on the labour productivity of each employee performing a specific function for the implementation of a specific contract and making a profit.

**Materials and methods.** Planning is carried out using the conceptual provisions of the current planning of the work of a trucking company, taking into account the relationship of activities and the demand for transportation, methods of probability theory and mathematical statistics, scientific principles of education and training of workers for the transport industry.

**Results.** The application of a new approach to planning is to combine the productivity of workers and the production of rolling stock of the Motor Transport Enterprises (MTE). This made it possible to develop a mathematical model and methodology, which takes into account that the productivity of workers must ensure the receipt of the planned income for each contract and its value will be planned within the confidence limits. When planning, probabilistic events are taken into account that occur during the development of sectors of the economy of the Russian Federation and affect the need for skilled staff. Mathematical modeling is carried out in relation to the real operating conditions of cargo transportation and specific functions of employees. The number of rolling stock and the required number of employees are determined by the development of rolling stock, by the development of a specific production function by an employee in modern conditions of contractual relations.

**Discussion and conclusions.** The results of the study are intended for the practice of road transport enterprises at the stage of determining indicators of labor productivity of workers and rolling stock.

**KEYWORDS:** mathematical model, methodology, labour productivity of workers, production of rolling stock.

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors would like to thank the staff of the Transport Organisation and Management Department, Vehicle Operation and Repairs Department of Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), as well as the reviewers of the article for their support in scientific research.

**The article was submitted 07.11.2021; approved after reviewing 24.11.2021;; accepted for publication 28.02.2022.**

**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:* Trofimova L.S., Zhigadlo A.P. Activities for road transport enterprises on indicators of workers and rolling stock productivity planning. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 74-83. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-74-83>

© Trofimova L.S., Zhigadlo A.P., 2022



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

**ВВЕДЕНИЕ**

Среди актуальных задач современного планирования работы предприятий автомобильного транспорта следует выделить разработку нового научно-методического подхода, направленного на взаимосвязь производительности труда работников и выработки подвижного состава. Производительность труда работников определяет результаты перевозок грузов и плановых обслуживаний как взаимосвязанных процессов деятельности предприятий.

Современная система образования направлена на подготовку работников в соответствии с требованиями практики производства и реализации продукции, в том числе автомобильного транспорта. Актуальность приобретают проблемы планирования взаимосвязи производительности труда работников, которые получают знания по программам дополнительного образования, программам магистратуры и реализуют их в деятельности предприятий автомобильного транспорта. Это обеспечит деятельность предприятий работниками, выполняющими определенные производственные функции с учетом освоения ключевых компетенций.

На сегодняшний день отечественными и зарубежными научными и практическими работниками выполняется большой объем исследований, посвященный повышению эффективности работы транспортной отрасли за счет обеспечения предприятий работниками, подготовленными по требованиям практики. На сегодняшний день разработаны концепции, внедрение которых в практику позволяет осуществить:

- снижение эксплуатационных затрат и сокращение времени на перевозку грузов за счет глобальной навигационной спутниковой системы для определения местонахождения подвижного состава в условиях реального времени [1, 2];

- расчет показателей перевозок от «двери до двери» в зависимости от режима, времени и стоимости [3, 4];

- институциональные изменения в стране по результатам практических и структурных изменений (на примере развития автомобильного транспорта Швеции, Финляндии, Голландии) [5, 6].

Доказано, что соответствие подготовки работников является эффективным инструментом для реализации экологической компетентности [7], формирования стратегий и планов безопасности дорожного движения [8].

Golbabaei F., Yigitcanlar T. & Bunker J. [9], Arto O. Salonen [10] делают вывод о том, что подготовка работников для АТП должна соответствовать уровню развития новых технологий вождения, связанных с применением электромобилей, который влияет на кадровые потребности и величину заработной платы, тариф при перевозке грузов, экологические показатели, а также способствует устойчивому развитию социального равенства. Это позволяет планировать взаимосвязь между потребностями в количестве подвижного состава и необходимой электроэнергии на основе персонализированных данных [11], рассматривать задачи реализации управляющих воздействий в системе «человек–машина» [12].

A. Moradi, E. Vagnoni [13] делают вывод о соблюдении требований к функционированию транспортных предприятий как устойчивых систем, учитывающих потребности различных социальных групп и обеспечивающих снижение загрязнений окружающей среды при планировании.

В ранее выполненных исследованиях делается акцент на учет вероятностных характеристик функционирования предприятий автомобильного транспорта при перевозке грузов и пассажиров [14]. В научных исследованиях сделан вывод о том, что планирование должно отражать определенную модель поведения АТП в бизнесе [15]. Установлено, что управление ресурсами в динамичных транспортных средах является сложной задачей, решение которой осуществляется в рамках планирования работы предприятий [16].

Исследования С. Kerdpitak, К. Jermisittiparsert [17] показали устойчивую взаимосвязь между обучением сотрудников, специализацией и конкурентными преимуществами в работе предприятий. Однако научно-практическая работа выполнена применительно к практике привлечения сотрудников в аптечные компании Таиланда.

М.В. Воронин, А.И. Шинкевич [18] предлагают применять системный подход к формированию кадрового состава предприятий нефтехимической промышленности и на первом этапе его реализации выделяют целевую подготовку студентов.

Исследования ученых показали, что оптимизация кадрового потенциала с применением логистического подхода является элементом работы предприятий, который включает в себя оценку кадровых ресурсов, выполняемых ключевых функций и показателей работы предприятия [19].



Рисунок 1 – Принципиальная схема планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава

Figure 1 – Scheme diagram of road transport planning for road transport enterprises in terms of the indicators determining workers and rolling stock productivity

Современные электронные технологии обучения направлены на обучение, позволяющее формировать у студентов самостоятельность, мобильность [20], все необходимые качества, которые пригодятся в практике работы АТП.

Существенным фактором при планировании производительности труда работников является оценка стоимости человеческого капитала [21]. Этот фактор позволит определить затраты на подготовку и обучение работников АТП.

Сегодня актуальной является задача по подготовке персонала, владеющим компетенциями, которые сформированы в рамках развития технологий.

В ранее выполненных исследованиях не проработаны задачи планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава. Для практики работы отсутствует ин-

струментарий, позволяющий выбрать оптимальное решение при формировании комбинаций по подбору и расстановке кадров с учетом освоения ключевых компетенций для выполнения производственных функций и получения прибыли АТП.

Целью исследования является разработка нового научно-методического подхода для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- изучить результаты ранее выполненных исследований, позволяющие выявить современные концептуальные подходы по планированию работы на автомобильном транспорте;
- разработать принципиальную схему планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям,

определяющим производительность труда работников и подвижного состава;

– установить показатели, определяющие производительность труда работников и подвижного состава и представить их математически в виде ограничений математической модели;

– разработать методику для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава и дать рекомендации по её применению.

Теоретическая значимость работы состоит в совершенствовании планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Практика работы предприятий автомобильного транспорта связана с влиянием случайных факторов, что необходимо отражать при разработке планов [22, 23]. Учитывается, что подготовка специалистов в учебных заведениях предполагает их максимальную профессионализацию, делается акцент на практико-ориентированное обучение [24].

Сущность применения нового подхода к планированию заключается в объединении производительности труда работников и выработки подвижного состава АТП (рисунок 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В математической модели количество работников изменяется от 1 до  $K$ , деятельность каждого работника направлена на выполнение  $m$ -й производственной функции с учетом освоения ключевой компетенции, которое необходимо в транспортной отрасли для выполнения конкретного договора. В результате заключения договора выполняется услуга на перевозку по  $i$ -му договору. Формула (1) позволяет определить прибыль предприятия. Величина дохода зависит от выработки подвижного состава, цены за перевозку (2). Выработка подвижного состава зависит от вероятностных технико-эксплуатационных показателей (3). Для определения показателей применяются методы теории вероятностей и математической статистики.

В математической модели предусмотрено требование по назначению подвижного состава для выполнения договора по результатам прохождения плановых технических обслуживаний (ТО), учитывается необходимость вы-

полнения текущих ремонтов (ТР) подвижного состава (4).

В современных условиях производительность труда определяется ценностным способом, при котором объем выполненной работы рассчитывается в действующих ценах и зависит от дохода и численности работников. Производительность труда должна обеспечить получение планового дохода по каждому договору. Определяя объем перевозок по каждому договору и производительность труда в рублях, учитывается количество тонн груза, которое может быть перевезено подвижным составом конкретного типоразмера, неизменность тарифа на весь период выполнения договора (5).

Назначение конкретного работника осуществляется в результате оценки возможности выполнения им определенной функции, позволяющей реализовать конкретный договор (6). Прежде всего, учитываются законодательные требования. Например, Постановление Правительства РФ от 01.10.2020 № 1588 «Об утверждении Правил допуска российских перевозчиков к осуществлению международных автомобильных перевозок». Освоение компетенций работников может оцениваться с помощью рейтинговой системы, которая формируется в предприятии по ключевым элементам. Перечень производственных функций и соответствующих им ключевых компетенций формируется с учетом ориентации на решение функциональных (профессиональных) задач, зависимость от мотивационных и ценностных установок человека и т. д. [25]. Установлено, что для оценки знаний целесообразно применять тестирование, для оценки умений и навыков – кейсы. Для оценки темперамента работника, его места в коллективе, межличностных отношений с коллегами и руководством используется анкетирование. Собеседование позволяет оценить мотивацию и эмоциональность работника [26].

Затраты на выполнение конкретного договора включают в себя заработную плату  $k$ -го работника при выполнении  $m$ -й производственной функции, необходимой для выполнения  $i$ -го договора, а также затраты, обеспечивающие перевозку грузов, подготовку определенных категорий работников для освоения компетенциями (7).

$$P = \sum_{i=1}^I (D_i - Z_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $P$  – прибыль АТП, руб.;  $D_i$  – доход от  $i$ -го договора, руб.;  $Z_i$  – затраты на  $i$ -го договор, руб.

$$D_i = \left[ \min_{j=1, J} \left[ \sum_{x=1}^X (Q_{i,x,j} \cdot n_{i,x,j}) \right] \right] \cdot D_i \cdot C_i; \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где  $Q_{i,x,j}$  – выработка  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора, т;  $n_{i,x,j}$  – булева переменная назначения с учетом возможности применения  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора,  $n_{i,x,j} = \overline{0, 1}$ ,  $n_{i,x,j} = \text{int}(n_{i,x,j})$ ;  $D_i$  – количество смен работы для выполнения условий  $i$ -го договора;  $D_i = \text{int}(D_i)$ ;  $C_i$  – тариф на перевозку груза по  $i$ -му договору, руб./т.

$$Q_{i,x,j} = f(l_{ge}, M_o, V_T, t_{n-p}), \quad (3)$$

где  $l_{ge}$  – длина ездки с грузом, км;  $M_o$  – масса отправки, т;  $V_T$  – средняя техническая скорость, км/ч;  $t_{n-p}$  – время на погрузку и разгрузку, ч.

$$n_{i,x,j} = \begin{cases} 1, \text{ если } \begin{cases} (N_{TO-1x} \cdot u_{TO-1x}) \geq y_{TO-1i,x,j}; \\ (N_{TO-2x} \cdot u_{TO-2,TPx}) \geq y_{TO-2,TPi,x,j}; \end{cases} \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}; \quad (4)$$

где  $N_{TO-1x}$ ,  $N_{TO-2x}$  – количество воздействий  $x$ -й единицы подвижного состава, ед.;  $N_{TO-1x} = \text{int}(N_{TO-1x})$ ,  $N_{TO-2x} = \text{int}(N_{TO-2x})$ ;  $u_{TO-1x}$ ,  $u_{TO-2,TPx}$  – трудоемкость воздействия, чел.·ч;  $y_{TO-1i,x,j}$ ,  $y_{TO-2,TPi,x,j}$  – необходимая трудоемкость, чел.·ч.

$$\left[ \sum_{k=1}^K (W_{k,m,i} \cdot h_{k,m,i}) \right] \cdot D_i \geq \left[ \min_{j=1, J} \left[ \sum_{x=1}^X (Q_{i,x,j} \cdot n_{i,x,j}) \right] \right] \cdot D_i \cdot C_i; \quad m = \overline{1, M}; \quad i = \overline{1, I}, \quad (5)$$

где  $W_{k,m,i}$  – производительность труда  $k$ -го работника при выполнении  $m$ -й производственной функции, необходимой для выполнения  $i$ -го договора, руб.;  $h_{k,m,i}$  – булева переменная назначения  $k$ -го работника с учетом возможности выполнения  $m$ -й производственной функции для реализации условий  $i$ -го договора,  $h_{k,m,i} = \overline{0, 1}$ ,  $h_{k,m,i} = \text{int}(h_{k,m,i})$ .

$$h_{k,m,i} = \begin{cases} 1, \text{ если } F_{k,m,i} \leq F_{k,m,i} \leq F_{k,m,i}; \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad i = \overline{1, I}; \quad k = \overline{1, K}; \quad m = \overline{1, M}; \quad (6)$$

где  $F_{k,m,i}$  – оценка возможности выполнения  $m$ -й производственной функции  $k$ -го работника по  $i$ -му договору, ед.;  $F_{\min}$ ,  $F_{\max}$  – соответственно максимальное и минимальное значение, при оценке возможности выполнения  $m$ -й производственной функции  $k$ -го работника по  $i$ -му договору, ед.

$$Z_i = \sum_{k=1}^K (G_{k,m,i} + F_{k,m,i}) + \sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^J (U_{i,x,j} + B_{i,x,j}), \quad i = \overline{1, I}; \quad m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

где  $G_{k,m,i}$  – затраты на подготовку  $k$ -го работника по  $m$ -й производственной функции для обеспечения выполнения  $i$ -го договора, руб.;  $F_{k,i}$  – заработная плата  $k$ -го работника по  $m$ -й производственной функции для обеспечения выполнения  $i$ -го договора, руб.;  $U_{i,x,j}$ ,  $B_{i,x,j}$  – затраты, обеспечивающие работу подвижного состава соответственно на топливо, техническое обслуживание, руб.

Алгоритм методики для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава, позволяет принять оптимальное решение при формировании комбинаций из работников, выполняющих определенные производственные функции с учетом ключевых компетенций и получении прибыли (рисунок 2). Методика учитывает различные эксплуатационные условия работы подвижного состава и величину выработки, которая может быть получена в этих условиях за счет реализации производственных функций работников.

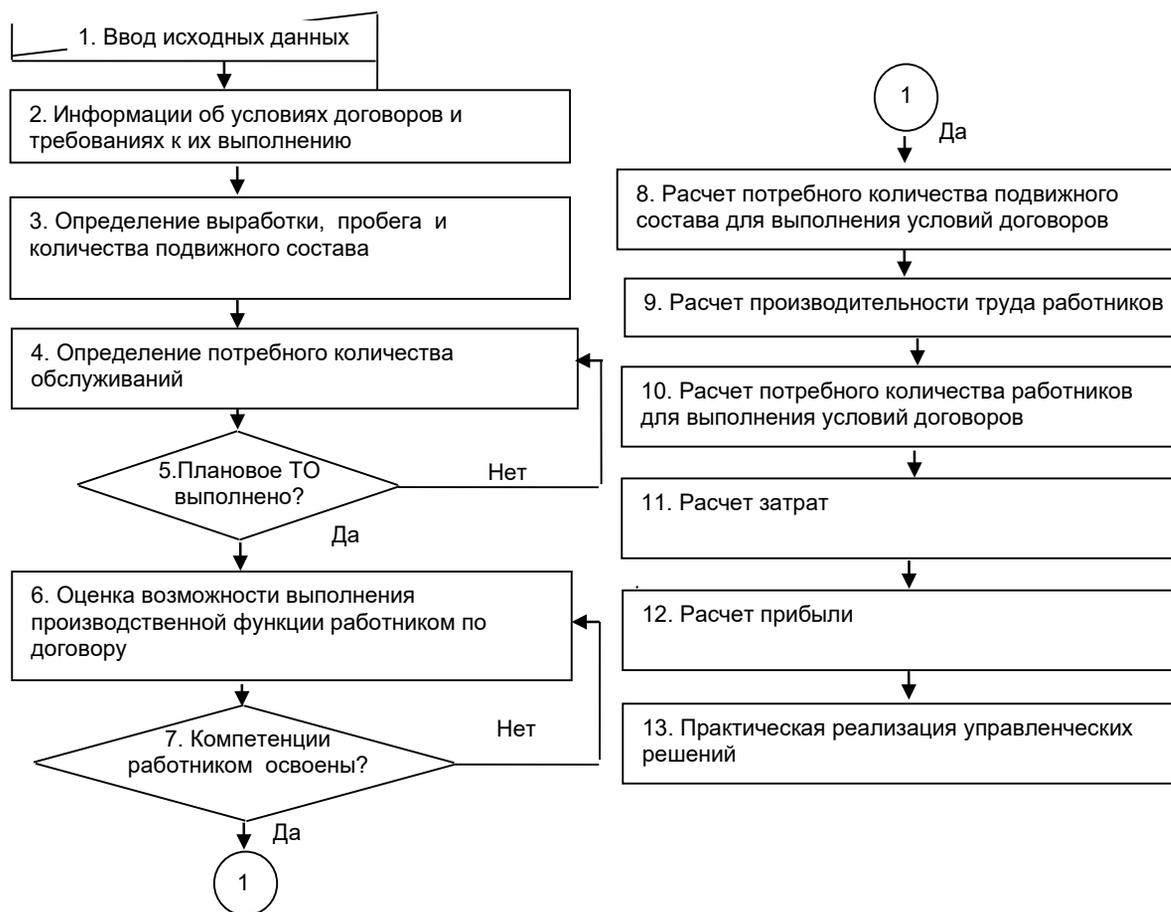


Рисунок 2 – Алгоритм методики для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава

Figure 2 – Methodology algorithm for planning the activities of road transport enterprises according to the indicators that determine workers and rolling stock productivity

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и их новизна заключаются в разработанном подходе к планированию работы АТП, который реализуется в виде математической модели и методики, учитывающих взаимосвязь производительности труда работников и выработку подвижного состава.

Планирование деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава, было выполнено для перевозки груза в междугородном сообщении и установлено, что необходимо:

- повышение квалификации работникам в соответствии с требованиями ФЗ № 273 от 29 декабря 2012 г. «Об образовании в Российской Федерации», приказ Министерства транспорта РФ № 282 от 31.07.2020 г. «Об утверждении профессиональных и квалификационных тре-

бований, предъявляемых при осуществлении перевозок к работникам юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, указанных в абзаце первом пункта 2 статьи 20 ФЗ «О безопасности дорожного движения»;

- обучение по курсу «Защитное вождение: грузовой транспорт»;

- обучение по курсу «Диспетчерская деятельность в сфере автомобильного и городского электрического транспорта».

Затраты на подготовку составят от 243200,7 до 256000,8 руб. Прибыль на выполнение условий договоров – от 21004298,9 до 23462248,8 руб.

Подготовка профессиональных кадров позволит выполнить требования заказчиков.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

- изучение результатов исследований по-

казало, что в современных концептуальных подходах к планированию не учитывается взаимосвязь производительности труда работников и выработки подвижного состава в деятельности предприятий автомобильного транспорта;

– определены условия для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава, и разработана математическая модель;

– разработана методика для планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников и подвижного состава, даны рекомендации по её применению.

Планирование реализуется за счет разработанной математической модели и методики, направленных на объединение производительности труда работников и выработки подвижного состава. Применение разработанного подхода в практике работы АТП позволит формировать ресурсы для выполнения условий заказчиков, привлекать к работе высококвалифицированных специалистов и использовать новое программное обеспечение для разработки и принятия управленческих решений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев В. В. Внедрение интеллектуальных систем на автомобильном транспорте. Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21), 2018. С. 117–121. DOI: 10.21685/2307-4205-2018-1-15.
2. MoMAC F. L. Mobility-Aware and Collision-Avoidance MAC for Safety Applications in VANETs. Transactions on Vehicular Technology. V. 67. №11. P. 10590-10602. Nov. 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2866496.
3. Малли С. Mobility as a Services (MaaS) – does it have critical mass? Transport Reviews. 2017. V. 37, Pages 247-25. DOI: 10.1080/01441647.2017.1280932.
4. Feneri A.-M., Rasouli S. Modeling the effect of Mobility-as-a-Service on mode choice decisions. Transportation Letters. 2021. V. 13, I. 7. DOI: 10.1080/19427867.2020.1730025.
5. Smith G., Steven J. Sarasini Mobility as a service: Comparing developments in Sweden and Finland. Research in Transportation Business & Management. 2018. V. 27. P. 36-45. DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.09.004.
6. Jittrapirom P., Marchau V., Heijden R. Dynamic adaptive policymaking for implementing Mobility-as-a Service (MaaS). Research in Transportation Business & Management. 2018. 27: 46-55 DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.07.001.
7. Мельникова О. Ю., Жигadlo А. П. Экологическая компетентность бакалавров социально-экономического профиля в контексте принципов образования для устойчивого развития. Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2018. Том 8, № 3. С. 139–152. DOI: 10.15293/2226-3365.1803.10.
8. Mikusova M., Zukowska J., Torok A. Community Road Safety Strategies in the Context of Sustainable Mobility. Management Perspective for Transport Telematics. Communications in Computer and Information Science. 2018. 897: 346-359. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7\_8.
9. Golbabaei F., Yigitcanlar T. & Bunker J. The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature. International Journal of Sustainable Transportation. 2021. V. 15. P. 731-748. DOI: 10.1080/15568318.2020.1798571.
10. Arto O. Salonen Passenger's subjective traffic safety, in-vehicle security and emergency management in the driverless shuttle bus in Finland. Transport Policy 2018. 61: 106-110. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.10.011.
11. Xu, Y., Çolak, S., Kara, E. C. Planning for electric vehicle needs by coupling charging profiles with urban mobility. Nat Energy 3. 2018. P. 484-493 DOI: 10.1038/s41560-018-0136-x.
12. Тырва В.О., Саушев А.В. О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах «человек–машина». Мехатроника, автоматизация, управление. 2020; 21(5): С. 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274-281.
13. Moradi A., Vagnoni E. A multi-level perspective analysis of urban mobility system dynamics: What are the future transition pathways? Technological Forecasting and Social Change. 2018. V. 126. P. 231-243. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.09.002
14. Tang Y., Cheng N., Wu W., Wang M., Dai Y. and Shen X., Delay-Minimization Routing for Heterogeneous VANETs With Machine Learning Based Mobility Prediction. Transactions on Vehicular Technology. 2019. V. 68, № 4. P. 3967-3979. DOI: 10.1109/TVT.2019.2899627
15. Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A.-M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso González, M.J., Narayan, J. Mobility as a Service: A critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. 2017. Urban Planning, 2. P. 13-25 DOI: 10.17645/up.v2i2.931.
16. Fontes R. D. R., Campolo C., Esteve C., Rothenberg and Molinaro A. From Theory to Experimental Evaluation: Resource Management in Software-Defined Vehicular Networks. IEEE Access. 2017.V. 5, P. 3069-3076. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2671030.
17. Kerdpitak C., Jermstittiparsert K. The Impact of Human Resource Management Practices on Competitive Advantage: Mediating Role of Employee Engagement in Thailand. Sys Rev Pharm. 2020. 11(1). P. 443-452. DOI: 10.5530/srp.2019.2.04
18. Воронин М. В., Шинкевич А. И. Роль кадрового обеспечения в развитии предприятий нефтехи-

мического комплекса. Компетентность. Competency (Russia). 2020. № 7. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10709.

19. Коломыц О. Н., Вознюк И. О., Нестеров В. В. Кадровая логистика в системе предприятия рынка. Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 1. С. 53–58. DOI: 10.31775/2305-3100-2019-1-53-58.

20. Ваганова О. И., Иляшенко Л. К. Основные направления реализации технологий студентоцентрированного обучения в вузе. Вестник Мининского университета. 2018. Т. 6, № 3(24). 2 с. DOI: 10.26795/2307-1281-2018-6-3-2.

21. Новикова И. В. Стратегическое управление трудовыми ресурсами предприятия. Экономика в промышленности. 2018. № 11(4). С. 318–326. DOI: 10.17073/2072-1633-2018-4-318-326.

22. Трофимова Л. С. Структура методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия. Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 71–78. DOI: 10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71.

23. Трофимова Л. С., Певнев Н. Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 4. С.243–252. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-243-252>.

24. Жигadlo А. П., Рыбакова Н. Н., Осадчук О. Л. Проектирование содержания подготовки педагогов профессионального обучения в вузе на основе компетентностного подхода. Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2018. № 2(32). С.86–93. DOI: 10.17238/issn1998-5320.2018.32.86.

25. Фалько С. Г., Яценко В. В. Архитектура компетенций персонала высокотехнологичных предприятий. Вестник Астраханского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 29–39. DOI: 10.24143/2073-5537-2019-1-29-39.

26. Шаихов Р. Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 3. С. 89–95. DOI 10.15593/24111678/2019.03.11.

## REFERENCES

1. Terentyev V.V. Implementation of intelligent systems in road transport. Reliability and quality of complex systems, 2018, no. 1 (21), pp. 117-121. (in Russian). DOI: 10.21685 / 2307-4205-2018-1-15.

2. MoMAC F. L. Mobility-Aware and Collision-Avoidance MAC for Safety Applications in VANETs. Transactions on Vehicular Technology. V. 67. №11. P. 10590-10602. Nov. 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2866496.

3. Малли С. Mobility as a Services (MaaS) – does it have critical mass? Transport Reviews. 2017. V. 37, Pages 247-25. DOI: 10.1080/01441647.2017.1280932.

4. Feneri A.-M., Rasouli S. Modeling the effect of Mobility-as-a-Service on mode choice decisions.

Transportation Letters. 2021. V. 13, I. 7. DOI: 10.1080/19427867.2020.1730025.

5. Smith G., Steven J. Sarasini Mobility as a service: Comparing developments in Sweden and Finland. Research in Transportation Business & Management. 2018. V. 27. P. 36-45. DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.09.004.

6. Jittrapirom P., Marchau V., Heijden R. Dynamic adaptive policymaking for implementing Mobility-as-a Service (MaaS). Research in Transportation Business & Management. 2018. 27: 46-55 DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.07.001.

7. Melnikova O. Yu., Zhigadlo AP Ecological competence of bachelors of socio-economic profile in the context of the principles of education for sustainable development. Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin. 2018, 8(3): 139-152. DOI: 10.15293 / 2226-3365.1803.10. (in Russian).

8. Mikusova M., Zukowska J., Torok A. Community Road Safety Strategies in the Context of Sustainable Mobility. Management Perspective for Transport Telematics. Communications in Computer and Information Science. 2018. 897: 346-359. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7\_8.

9. Golbabaei F., Yigitcanlar T. & Bunker J. The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature. International Journal of Sustainable Transportation. 2021. 15: 731-748. DOI: 10.1080/15568318.2020.1798571.

10. Arto O. Salonen Passenger's subjective traffic safety, in-vehicle security and emergency management in the driverless shuttle bus in Finland. Transport Policy 2018. 61: 106-110. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.10.011.

11. Xu, Y., Çolak, S., Kara, E. C. Planning for electric vehicle needs by coupling charging profiles with urban mobility. Nat Energy 3. 2018. : 484-493 DOI: 10.1038/s41560-018-0136-x.

12. Tyrva V.O., Saushev A.V. On the implementation of combined control actions on the object in the "man-machine" systems. Mechatronics, automation, control. 2020, 21 (5): 274-281. DOI: 10.17587 / mau.21.274-281.

13. Moradi A., Vagnoni E. A multi-level perspective analysis of urban mobility system dynamics: What are the future transition pathways? Technological Forecasting and Social Change. 2018. 126: 231-243. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.09.002

14. Tang Y., Cheng N., Wu W., Wang M., Dai Y. and Shen X., Delay-Minimization Routing for Heterogeneous VANETs With Machine Learning Based Mobility Prediction. Transactions on Vehicular Technology. 2019. 68(4): 3967-3979. DOI: 10.1109/TVT.2019.2899627

15. Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A.-M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso González, M.J., Narayan, J. Mobility as a Service: A critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. 2017. Urban Planning, 2. P. 13-25 DOI: 10.17645/up.v2i2.931.

16. Fontes R. D. R., Campolo C., Esteve C., Rothenberg and Molinaro A. From Theory to

Experimental Evaluation: Resource Management in Software-Defined Vehicular Networks. IEEE Access. 2017.V. 5, P. 3069-3076. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2671030.

17. Kerdpitak C., Jernsittiparsert K. The Impact of Human Resource Management Practices on Competitive Advantage: Mediating Role of Employee Engagement in Thailand. Sys Rev Pharm. 2020. 11(1). P. 443-452. DOI: 10.5530/srp.2019.2.04

18. Voronin M.V., Shinkevich A.I. The role of staffing in the development of petrochemical enterprises. Competence. Competency. 2020, no. 7, pp. 18-24. (in Russian). DOI: 10.24411 / 1993-8780-2020-10709.

19. Kolomyts O.N., Voznyuk I.O., Nesterov V.V. Personnel logistics in the system of the enterprise of the market. Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management. 2019, 1: 53-58. DOI: 10.31775 / 2305-3100-2019-1-53-58. (in Russian)

20. Vaganova O.I., Ilyashenko L.K. The main directions of the implementation of student-centered learning technologies in the university. Bulletin of Minin University. 2018, 6. 3 (24): 2-14. DOI: 10.26795 / 2307-1281-2018-6-3-2. (in Russian)

21. Novikova I.V. Strategic management of human resources of the enterprise. Economy in industry. 2018, no 11 (4), pp. 318-326. (in Russian). DOI: 10.17073 / 2072-1633-2018-4-318-326.

22. Trofimova L.S. , Pevnev N.G. The structure of the methodology for the current planning of the work of a freight motor transport enterprise, SibADI Bulletin, 2017, no. 6 (58), pp. 71-78. (in Russian). DOI: 10.26518 / 2071-7296-2017-6 (58) -63-71.

23. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Matematicheskaya model' funkcionirovaniya avtotransportnogo predpriyatiya pri perevozke gruzov v mezhdugorodnom soobshchenii dlya tekushchego. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. 22.(4): 243-252. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-243-252>.

24. Zhigadlo A. P., Rybakova N. N., Osadchuk O. L. Designing the content of training teachers of vocational training at a university based on the competence-based approach. Human Science: Humanities Research, 2018, 2 (32): 86-93. DOI: 10.17238 / issn1998-5320.2018.32.86. (in Russian)

25. Falko S. G., Yatsenko V. V. The architecture of the competencies of the personnel of high-tech enterprises. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. 2019, 1: 29-39. DOI: 10.24143 / 2073-5537-2019-1-29-39 (in Russian).

26. Shaikhov R.F. Control of production personnel at a motor transport enterprise. Transport. Transport facilities. Ecology. 2019, 3: 89-95. DOI 10.15593 / 24111678 / 2019.03.11. (in Russian).

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Трофимова Л.С. Формирование направления исследования, цели и задач, научной новизны, описание математической модели и методов, результатов исследований в части планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность подвижного состава. (50%).*

*Жигadlo А.П. Формирование направления исследования, цели и задач, научной новизны, описание математической модели и методов, результатов исследований в части планирования деятельности предприятий автомобильного транспорта по показателям, определяющим производительность труда работников (50%).*

## AUTHORS' CONTRIBUTION

*Liudmila S. Trofimova. Formation of research direction, aims and objectives, scientific novelty, description of the mathematical model and methods, research results in terms of planning of road transport enterprises activities according to the indicators determining the performance of the rolling stock. (50%).*

*Alexandr P. Zhigadlo. Formation of research direction, aims and objectives, scientific novelty, description of the mathematical model and methods, research results in terms of planning the road transport enterprises activities according to the indicators determining the labour productivity of employees (50%).*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, проф.*

*Жигadlo Александр Петрович – канд. техн. наук, д-р пед. наук, доц., ректор.*

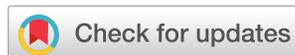
## AUTHORS AFFILIATION

*Liudmila S. Trofimova, Doctor of Technical Sciences, Professor.*

*Alexander P. Zhigadlo, Candidate of technical sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Rector.*

УДК 665.765

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-84-100>

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**С.В. Пашукевич**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

г. Омск, Россия

sofia96@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ухудшение состояния моторного масла в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) напрямую связано с попаданием в картер различного рода загрязнителей. В зависимости от типа загрязнения изменяется вид отложений на поверхностях деталей двигателя. Нельзя не отметить тот факт, что на работоспособность моторного масла чрезвычайно влияет процесс окисления, органические кислоты, возникающие в течение него, способствуют появлению коррозии на деталях ДВС. Также невосполнимый ущерб наносят вода, дизельное топливо, охлаждающая жидкость, частицы сажи, асфальтены и т. д.

**Материалы и методы.** В данной работе представлены результаты широкого литературного обзора, направленного на изучение основных типов загрязнителей моторных масел. Приведены классификации по агрегатному состоянию загрязнителей, а также по возможным путям их проникновения в смазочный материал. Наиболее узко в данной статье рассмотрены жидкостные загрязнители. Для демонстрации негативного влияния попадания в моторное масло загрязнений приведены фотографии деталей двигателя внутреннего сгорания с отложениями, находящимися на поверхностях составных частей ДВС.

**Результаты.** Приведена классификация основных загрязнителей моторных масел, указаны последствия, возникающие вследствие попадания инородных соединений в рассматриваемый смазочный материал.

**Заключение.** Установлено воздействие загрязнителей на детали ДВС и смазочного материала. На основе классификации можно судить о причинах попадания и возможных последствиях воздействия загрязнений на работу двигателя.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моторное масло, двигатель внутреннего сгорания, окисление моторного масла, металлические поверхности, сажа, шлам, охлаждающая жидкость, дизельное топливо, износ, трение

**Статья поступила в редакцию 22.11.2021; одобрена после рецензирования 10.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

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

**Для цитирования:** Пашукевич С.В. Классификация загрязнителей моторных масел для дизельных двигателей // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 84-100. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-84-100>

© Пашукевич С.В., 2022

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-100>  
Original article

## CLASSIFICATION OF CONTAMINANTS IN DIESEL ENGINE OILS

**Sofia V. Pashukevich**

Omsk State Technical University,  
Omsk, Russia

[sofia96@bk.ru](mailto:sofia96@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### ABSTRACT

**Introduction.** *The deterioration of engine oil in an internal combustion engine (ICE) is directly related to the ingress of various pollutants into the crankcase. Depending on the type of contamination, the type of sediment on engine part surfaces varies. It should be noted that the functioning of the motor oil is extremely affected by the oxidation process, and organic acids produced during the process contribute to corrosion of ICE parts. Water, diesel, cooling fluid, soot particles, asphaltene, etc. also cause irreparable damage.*

**Materials and methods.** *This paper presents the results of an extensive literature review aimed at studying the main types of motor oil pollutants. Classifications are given for the aggregate state of pollutants, as well as for possible ways of their penetration into the lubricant. Liquid pollutants are the most narrowly considered in this article. To demonstrate the negative effect of contaminants entering the engine oil, photographs of internal combustion engine parts with sediments on the surfaces of the internal combustion engine components are presented.*

**Results.** *The classification of the main pollutants of motor oils is given; the consequences arising from the ingress of foreign compounds into the lubricant in question are indicated.*

**Conclusion.** *The effect of contaminants on the parts of the internal combustion engine and the lubricant has been established. On the basis of the classification, it is possible to judge the causes of entry and the possible consequences of the impact of contamination on the operation of the engine.*

**KEYWORDS:** engine oil, internal combustion engine, engine oil oxidation, metal surfaces, soot, sludge, coolant, diesel fuel, wear, friction

**The article was submitted 22.11.2021; approved after reviewing 10.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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: Pashukevich S.V. Classification of contaminants in diesel engine oils. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (1): 84-100. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-100>*

© Pashukevich S.V., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Моторное масло способствует уменьшению трения, предотвращению коррозии деталей двигателя, а также оно отводит тепло, особенно с днища поршня. Загрязнение данного вида смазочного материала происходит и при нормальной работе двигателя внутреннего сгорания. Среди наиболее распространенных загрязнителей – вода, топливо (несгоревшее или частично сгоревшее), охлаждающая жидкость, которые смешиваются с моторным маслом и вызывают в совокупности с высокой температурой его окисление. Конечно, одним из основных загрязнителей смазочных масел, приводящим к ухудшению их состава, соответственно, и снижению качества работоспособности, является топливо. Разбавление масла топливом ускоряет износ компонентов двигателя и снижает рабочие характеристики моторного масла и срок его службы. Загрязненное моторное масло может вызвать отказ компонентов двигателя, поэтому в моторное масло добавляют присадки, чтобы уменьшить окислительное повреждение, вызванное несгоревшим топливом, следами воды, наличием гликолей и других загрязнителей в масле [1, 2].

Моторные масла состоят из двух частей: базового масла (различной природы) и химических присадок для улучшения качества и

свойств масел, включая защитные присадки: 1) присадки для защиты поверхности и антикоррозионные присадки для уменьшения трения, коррозии и снижения контакта с металлом; антикоррозионные присадки для предотвращения ржавления внутренней части двигателя; присадки, очищающие поверхность от отложений и 2) присадки для улучшения работы двигателя за счет стабилизации вязкости масла, чтобы уменьшить изменение вязкости при нагревании [3].

Смазочное масло образует пленку между движущимися поверхностями, которая уменьшает трение. Однако моторное масло – кладь примесей. Они бывают в виде твердых, жидких и газообразных загрязнителей. При неконтролируемом воздействии, особенно в условиях низких температур, в моторном масле эти загрязнители могут накапливаться до чрезмерного уровня. Высокий уровень загрязнения смазочного материала вызывает износ механических компонентов, а также разрушение присадок и базовых масел. Результат – снижение производительности, сокращение срока службы двигателя и ограниченный ресурс моторного масла. Загрязнения смазочного материала уменьшают время достижения маслами своих предельных показателей и ухудшают параметры работы дизельных двигателей [4]. На рисунке 1 указаны основные типы загрязнений.



Рисунок 1 – Основные типы загрязнителей моторного масла

Figure 1 – Main types of engine oil pollutants



Рисунок 2 – Пути попадания твёрдых загрязнителей в моторное масло

Figure 2 – Ways for solid contaminants to enter the engine oil

Возможные пути попадания загрязнений в систему смазки двигателя, а также примеры загрязнителей для каждого типа приведены на рисунке 2.

Производители дизельных двигателей проявляют большую осторожность во время процессов производства и сборки для обеспечения высокого уровня качества. Однако материалы для изготовления отливок, механическая стружка, абразивные материалы, полировальные пасты и даже ворсинки остаются после изготовления и капитального ремонта. Эти загрязнители могут быстро повредить подвижные части двигателя [5, 6, 7].

Внешнее проникновение является основным источником загрязнения твердыми частицами. Частицы в воздухе в виде песка, соли и других минералов попадают через систему воздухоподачи двигателя и смешиваются с распыленным топливом, которое сжимается, а затем сгорает. Поскольку большинство этих частиц имеет температуры плавления значительно выше температур, достигаемых при сгорании дизельного топлива, в процессе горения они остаются твердыми абразивными частицами. Загрязнение воздуха является основной причиной износа пары «кольцо–цилиндр» [8].

Сильная ударная волна давления, создаваемая во время сгорания, выталкивает газы через зазоры поршневых колец в картер двигателя. Этот процесс, известный как прорыв, переносит загрязнения в моторное масло. Частицы также могут задерживаться в масляной пленке. Затем они попадают в масляный поддон при следующем ходе поршня. Выхлопные газы попадают в смазочное масло аналогично. Эти выхлопные газы включают несгоревшее топливо, воду, окись азота, сажу и другие частично сгоревшие углеводороды. Более высокие уровни рециркуляции выхлопных газов увеличивают загрязнение смазочного масла твердыми частицами [9, 10].

Одним из путей для внешнего попадания загрязняющих веществ в моторное масло является вентиляция картера, что за счет разрежения может способствовать поступлению большого количества пыли и воды, последние попадают непосредственно в масляный поддон. Кроме того, вода в сочетании с антифризными соединениями, такими как гликоль, может подаваться в масляную полость под давлением через дефектные прокладки головки или иногда через трещину в блоке.

Внутреннее образование загрязнений происходит в результате износа механических

деталей и разрушения смазки. Износ механических компонентов в результате истирания, усталости, адгезии и коррозии приводит к попаданию вредных частиц в масло. Остатки износа находятся в виде частиц твердого металла и оксидов абразивных металлов. Частицы износа, размеры которых не контролируются стандартной фильтрацией, могут накапливаться и сильно загрязнять смазочный материал [11, 12, 13].

Ухудшение качества моторного масла – это потеря важных свойств масла плюс накопление вредных веществ, полученных в ходе эксплуатации автомобильной техники. Эти материалы включают кислоты, шламы, гели и осадки присадок. Эти загрязняющие вещества могут изнашивать движущиеся детали, а также засорять проточные каналы и поверхности теплообмена. Если в масле скапливаются продукты износа и материалы, образующиеся в результате разрушения моторного масла, то в результате увеличивается износ и образуется лавинообразное поступление загрязнений. Процесс изнашивания поверхностей частицами и образование новых частиц, которые, в свою очередь, вызывают больший износ, известен как цепная реакция износа [14].

#### **Попадание дизельного топлива в моторное масло**

Разбавление моторного масла дизельным топливом – явление, которое возникает естественным образом при каждом запуске двигателя. Данная ситуация наиболее часто встречается в дизельных двигателях, поскольку их специфика работы основана на цикле воспламенения от сжатия и, следовательно, эффективность сгорания полностью зависит от температуры двигателя, в частности от температуры камеры сгорания. Теоретически чем холоднее камера сгорания, тем выше степень разбавления моторного масла топливом. Основная проблема, связанная с разбавлением моторного масла топливом в дизельных двигателях, – это снижение вязкости моторного масла, которая потенциально оказывает значительное влияние на ухудшение качества смазочного материала между различными движущимися частями двигателя в условиях высоких нагрузок, а также в условиях низких температур [15].

Обычной причиной разбавления моторного масла топливом является утечка (прорыв) газов между поршневыми кольцами и неплотностями цилиндропоршневой группы. В идеальной системе поршень должен идеально прилегать к стенке цилиндра. Однако ни

один цилиндр не является идеально круглым, ни одна поверхность не является идеально гладкой, и нет идеального уплотнения. На каждом цилиндре двигателя имеется перекрестная штриховка из микроскопических канавок, именно они помогают со смазкой, давая моторному маслу возможность задерживаться на поверхности зеркала цилиндра. В данном случае определенное количество топлива и выхлопных газов будет выходить через уплотнение между поршневыми кольцами и цилиндром.

Мокрая укладка – явление, которое происходит в двигателях с воспламенением от сжатия. В то время как бензиновый двигатель, например, воспламеняет свою топливовоздушную смесь с помощью искры в подходящее время для инициирования сгорания, двигатель с воспламенением от сжатия полагаются исключительно на теплоту воздушного заряда в цилиндре во время процесса впрыска, чтобы инициировать сгорание. Двигатель, который не достиг рабочей температуры, будет иметь более низкую эффективность сгорания, чем «горячий» двигатель. Это связано с природой процесса горения, заряд сжатого воздуха в двигателе при рабочей температуре (или близкой к ней) содержит больше тепла, чем заряд сжатого воздуха двигателя, который значительно ниже рабочей температуры.

В условиях, когда температура в камере сгорания низкая, впрыскиваемое топливо имеет тенденцию воспламеняться на более позднем этапе такта сжатия, чем когда температура в камере сгорания выше. В таких случаях распыляемое форсункой топливо будет иметь тенденцию отлагаться на стенках цилиндра, смывая моторное масло и в конечном итоге проходя через неплотности поршневых колец и попадая в картер [16].

Мокрая укладка и, следовательно, разбавление моторного масла топливом обычно наиболее заметно в условиях низких температур сгорания. Эти события можно разделить на два случая: длительная работа двигателя на холостом ходу и период, в течение которого работающий двигатель еще не прогрелся до рабочей температуры. Первоначальный запуск дизельного двигателя, особенно в холодную погоду, также представляет собой условия, при которых разжижение моторного масла топливом происходит с большей скоростью. Несмотря на то, что для обеспечения возможности сгорания вырабатывается достаточно тепла, стенки цилиндра и общая температура самого цилиндра относительно низкие.

По этой причине обычно не рекомендуется оставлять работать дизельный двигатель на холостом ходу, чтобы довести его до полной рабочей температуры. Фактически дизельный двигатель редко достигает рабочей температуры в течение разумного промежутка времени без привода, двигатель нагревается за гораздо меньшее время, если приложить нагрузку. Это не означает, что дизельный двигатель следует нагружать сразу после запуска, однако нельзя допускать, чтобы он работал на холостом ходу в течение продолжительных периодов времени; от 3 до 5 мин (в зависимости от температуры окружающей среды) работы на холостом ходу обычно достаточно, чтобы давление масла стабилизировалось, а температура двигателя достигла подходящего диапазона перед поездкой в холодных условиях. В теплую погоду вполне достаточно 1–2 мин работы двигателя на холостом ходу перед поездкой.

Попадание топлива в моторное масло стало еще большей проблемой с введением сажевого фильтра, который требует цикла регенерации для периодической очистки фильтра от твердых частиц. Во время цикла регенерации в выхлопной системе требуется значительное количество тепла, чтобы эти частицы сгорели. Следовательно, необходимо впрыскивать топливо в поток выхлопных газов, повышая температуру и создавая условия, в которых эти частицы могут полностью сгореть и выбрасываться из выхлопной трубы.

Поскольку топливо впрыскивается в цилиндр во время такта выпуска, оно следует по пути выходящего потока выхлопных газов и входит в выпускной коллектор в качестве распыленного неочищенного топлива. Поскольку при впрыске этого топлива не происходит возгорания, возникает тенденция отложения на стенках цилиндра, и в процесс вступает ранее описанное условие «мокрой укладки». Ответом на проблемы, с которыми сталкиваются циклы пост-впрыска для регенерации сажевого фильтра, было введение 9-го или 7-го инжектора, в зависимости от числа цилиндров двигателя, чтобы топливо могло впрыскиваться в поток выхлопных газов, предотвращая попадание его в масло. Наиболее серьезные проблемы при разбавлении моторного масла топливом вызывают снижение вязкости и деградация масла. Дизельное топливо в масле увеличивает скорость разложения моторного масла, а также снижает его вязкость. По мере того, как вязкость уменьшается, и масло становится более жидким, а это приводит к потере несущей способности масел, что способствует

повышенным износам деталей двигателей. Моторное масло – это единственный слой защиты между движущимися частями двигателя. Тонкая пленка моторного масла подвергается экстремальному давлению и усилиям, поскольку она создает барьер между двумя движущимися / вращающимися поверхностями. По мере разжижения масла этот барьер может выйти из строя, увеличивая скорость износа. По мере износа компоненты физические допуски между двумя поверхностями увеличиваются [17].

#### **Попадание воды в моторное масло**

Вода может существовать в масле в трех состояниях или фазах. Первое состояние, известное как растворенная вода, характеризуется отдельными молекулами воды, рассредоточенными в масле. По этой причине масло может содержать значительную концентрацию растворенной воды без видимых признаков ее присутствия. Как только количество воды превысит максимальный уровень, чтобы она оставалась растворенной, масло насыщается. В этот момент вода переходит во взвешенное состояние и находится в виде микроскопических капель, известных как эмульсия.

Добавление большего количества воды к эмульгированной смеси масло/вода приведет к разделению двух фаз с образованием слоя свободной воды, а также свободного и/или эмульгированного масла.

В системе смазки двумя наиболее вредными фазами являются свободная и эмульгированная вода. В подшипниках, например несжимаемости воды по отношению к нефти, может привести к потере гидродинамической масляной пленки, что, в свою очередь, приводит к чрезмерному износу. Даже один процент воды в масле может сократить срок службы подшипников скольжения на 90%.

С подшипниками качения дело обстоит еще хуже. Мало того, что вода разрушает прочность масляной пленки, но и свободная, и эмульгированная вода при экстремальных температурах и давлениях, возникающих в зоне нагрузки подшипника качения, может привести к мгновенному испарению, вызывающему эрозионный износ.

При определенных условиях молекулы воды могут быть разорваны на составляющие атомы кислорода и водорода в результате высокого давления, создаваемого в зоне контакта деталей подшипника качения. Из-за своего относительно небольшого размера ионы водорода, образующиеся в этом процессе, могут поглощаться поверхностью дорожки качения

подшипника, что приводит к явлению, известному как водородное охрупчивание.

Водородная хрупкость приводит к тому, что материал подшипника становится хрупким и склонным к растрескиванию под поверхностью дорожки качения. Когда эти подповерхностные трещины распространяются на поверхность, это может привести к появлению точечной коррозии и сколов.

Поскольку воздействие свободной и эмульгированной воды более вредно по сравнению с растворенной водой, общее практическое правило заключается в том, чтобы уровень влажности оставался значительно ниже точки насыщения. Для большинства используемых масел это означает от 100 до 300 частей на миллион или меньше в зависимости от типа масла и температуры.

Однако даже на этих уровнях все равно может быть нанесен значительный ущерб. Вообще не бывает слишком мало воды и необходимо приложить все разумные усилия для минимального загрязнения моторного масла водой.

Вода не только оказывает прямое вредное воздействие на компоненты машин, но также играет непосредственную роль в скорости старения смазочных масел. Присутствие воды в смазочном масле может привести к десятикратному увеличению степени окисления, что приведет к преждевременному старению масла, особенно в присутствии каталитических металлов, таких как медь, свинец и олово.

Кроме того, известно, что некоторые типы синтетических масел, такие как сложные эфиры фосфорной кислоты и сложные эфиры двухосновной кислоты, вступают в реакцию с водой, что приводит к разрушению основного компонента и образованию кислот.

Загрязнение влагой может повлиять не только на базовое масло. Некоторые добавки, такие как сернистые присадки и фенольные антиоксиданты, легко гидролизуются водой, что приводит как к гибели присадок, так и к образованию кислотных побочных продуктов.

Эти кислотные побочные продукты могут затем вызвать коррозионный износ, особенно в компонентах, содержащих мягкие металлы, такие как баббит, используемый в подшипниках скольжения, а также в деталях из бронзы и латуни. Другие добавки, например деэмульгирующие агенты, диспергаторы, детергенты и ингибиторы ржавчины, могут вымываться излишней влажностью. Это приводит к образованию и накоплению шлама и отложений, засорению фильтров и плохой деэмульгируемости масла/воды [18].

Небольшая доля воды, которая присутствует в моторном масле, не окажет большого влияния ни на вязкость смазочного материала, ни на коэффициент трения. Когда масло не будет подвергаться эмульгированию, вода не причинит вреда при условии, что она попадет в поддон таким образом, что не сможет попасть во всасывающее устройство насоса.

Опасная точка достигается, когда либо смесь моторного масла и воды становится слишком вязкой, либо скопление свободной воды достигает впускного отверстия насоса [19].

Когда продукты сгорания просачиваются мимо поршней, водяной пар поступает в область картера, следовательно, паровая часть вытекающих газов будет конденсироваться. При первом запуске холодного двигателя воздух в картере нагревается от горячего днища поршня. Из насыщенного паром воздуха будет конденсироваться влага, когда он соприкоснется с холодным маслом, холодными сторонами картера и стенками масляного поддона.

Самое главное, что значительная прямая конденсация воды будет происходить в рабочей части цилиндра до тех пор, пока температура будет ниже 100 °С. Такое отложение, конечно, незначительно сказывается в период теплой погоды, но на него приходится основная часть воды, образующейся при зимней эксплуатации автомобилей.

Как только температура масла поднимется выше 100 °С, при циркуляции масла вода, присутствующая в виде эмульгированной, испаряется. Таким образом, в летних условиях вождения при каждом запуске двигателя будет образовываться некоторое количество воды, и эффект утечки через поршни, конечно, во многом одинаков независимо от температуры атмосферы. Так как температура деталей камеры сгорания двигателя при нормальной работе будет более 150 °С, а температура масла не менее 120 °С, смазка будет отторгать воду быстрее, чем она поступает [20].

Эмульсия более вязкая, чем чистое масло, но не настолько, чтобы мешать нормальной работе, по крайней мере, если количество воды не превышает 6%.

Основная масса воды, которая попадает в масляный поддон, образуется в результате прямой конденсации на внутренних стенках цилиндров. Опускающийся поршень обнажает поверхность железа с масляным покрытием при температуре всего на несколько градусов выше температуры воды в рубашке. При температуре воды 65 °С внутренняя стенка

цилиндра может быть значительно горячее, чем сама вода, но при низких температурах разница очень незначительна. В течение большей части рабочего хода и всего такта выпуска цилиндр заполняется газами, значительную часть которых составляет водяной пар. Во время тактов рабочего хода и выпуска времени достаточно для того, чтобы в цилиндре сконденсировалось заметное количество воды. Образовавшаяся таким образом вода не выходит вместе с выхлопными газами, она остается в цилиндре и попадает в масляный поддон.

Если бы смазка цилиндра или поршня была идеальной, то есть если бы смазка была настолько хорошей, насколько это возможно в идеальном подшипнике без какого-либо металлического контакта между поршневыми кольцами и стенкой цилиндра, вероятно, не имело бы большого значения, существовал ли небольшой процент воды в свободном состоянии или в виде эмульсии. Но быстрота износа поршневых колец является доказательством того, что смазка далека от идеала. Кроме того, в период низкотемпературных условий, когда осаждение воды происходит наиболее быстро, осаждение тяжелых остатков топлива также максимально, и они имеют мощное действие растворителя масляной пленки. Естественное несовершенство смазки плюс растворение масляной пленки означают, что части стенки цилиндра фактически обнажаются при рабочем ходе. При попадании в моторное масло вода будет иметь тенденцию накапливаться в этих открытых местах и смачивать их, что затруднит восстановление масляной пленки. Можно допустить, что эффект разбавителя в виде топлива при смывании масляной пленки со стенок оказывает большее влияние на ускорение износа, чем осаждение небольшого количества задействованной воды, но последним нельзя полностью пренебрегать. Хотя может быть трудно определить точную величину с точки зрения снижения износа поглощающего воду свойства масла, тот факт, что оно должно быть полезным, – неоспорим [21, 22, 23].

#### **Загрязнение моторного масла гликолем**

Гликоль, основной ингредиент антифриза, обычно смешивается с водой в соотношении 50/50 с образованием жидкого «хладагента» для передачи тепла, повышения температуры кипения и понижения температуры замерзания. Когда в состав входят присадки, охлаждающая жидкость может эффективно защищать от коррозии и кавитации [24].

В состав антифризов, используемых в качестве охлаждающих жидкостей, входит широкий ассортимент металлоорганических и органических добавок. Они используются для защиты металлов в системе охлаждения от коррозии/кавитации, контроля накипи, предотвращения пенообразования и поддержания pH. Общие примеры добавок включают различные фосфаты, борат натрия, молибдат, силикат натрия, себацинат калия и нитрат натрия. Как и присадки в моторном масле, эти присадки будут способствовать изменению концентрации элементов натрия, бора, калия, кремния и фосфора в охлаждающей жидкости.

Гликоль может попадать в моторные масла и другие смазочные масла различными способами, такими как дефектные или изношенные уплотнения, «выдутые» прокладки головки блока цилиндров, неправильно затянутые болты с головкой, термически деформированные или треснувшие головки цилиндров (от низкого уровня охлаждающей жидкости до заедания термостата), треснувший блок или головка блока цилиндров от замерзшей охлаждающей жидкости, неправильно обработанные поверхности головки и блока цилиндров, коррозионное повреждение гильз цилиндров, кавитационная эрозия/коррозия гильз цилиндров, электрохимическая эрозия, повреждение или корродирование сердечников охладителя, отказ уплотнения водяного насоса и засорение сливного отверстия.

Фактически, по оценкам крупного производителя дизельных двигателей, 53% всех серьезных отказов двигателей происходят из-за утечек охлаждающей жидкости. Для многих дизельных двигателей и двигателей, работающих на природном газе, самый высокий риск загрязнения возникает, когда двигатель не заведен. В таких случаях охлаждение двигателя при периодической работе может привести к внутренним утечкам, связанным с термической ползучестью, например в головках цилиндров, где существует риск рецессии или смещения уплотнительных прокладок. Более высокое гидростатическое давление охлаждающей жидкости по отношению к системе смазочного масла увеличивает риск, когда двигатель не работает. Это может привести к попаданию охлаждающей жидкости в смазку [25, 26].

Другой распространенный источник утечки в двигателях с мокрыми гильзами цилиндров связан с химико-механической перфорацией гильз, вызванной паровой кавитацией. Это происходит, когда гильзы сильно вибрируют

(со стороны нагрузки) в ритме движения поршня, сжатия и сгорания. Это движение заставляет часть волн давления создавать области отрицательного давления, в которых образуются пузырьки пара (полости). При горении в камере сгорания пузырьки пара лопаются со скоростью звука, вызывая струи жидкости и высочайшее поверхностное давление. Такая локализованная энергия может буквально взорвать небольшие дыры в защитной оксидной пленке на стенке гильзы, как это происходит в паровой кавитации в гидравлических насосах.

Повреждение может быть дополнительно вызвано химическим воздействием на металл, обнаженный во время этой кавитации. Со временем это может привести к перфорации хвостовика и утечке охлаждающей жидкости. Режим разрушения распространяется за счет комбинации механического (локализованная кавитация) и химического (коррозия обнаженного основного металла) воздействия [27].

Было обнаружено, что некоторые добавки, такие как молибдат и нитрит натрия, резко замедляют развитие кавитационной коррозии. Если защитная оксидная пленка расслаивается под действием энергии кавитации, добавка преобразует барьерную пленку, чтобы остановить дальнейшее её распространение. Однако для обеспечения качества важна концентрация этих добавок, вводимых в охлаждающую смесь. Недостаточное содержание может привести к ускоренной точечной коррозии, в то время как избыточная концентрация может вызвать гелеобразование охлаждающей жидкости, коррозию припоя на основе свинца и другие проблемы.

Негативные моменты, связанные с попаданием охлаждающей жидкости в моторное масло, заключаются в следующих моментах: постоянная утечка охлаждающей жидкости постепенно приводит к высокой концентрации гликоля в смазочном материале; период интенсивной эксплуатации, во время которой моторное масло становится очень горячим и вызывает разложение гликоля, а затем полимеризацию с образованием лаковых соединений, которые остаются растворенными в горячем смазочном материале; при выключении двигателя масло охлаждается, и лаковая пленка проявляется на поверхностях деталей двигателя [28 - 30].

Ключевым элементом являются продукты разложения или окисления гликоля, а не сам гликоль. Гликоль, попав в картер, разлагается до гликолевой, глиоксалевой кислоты, а

также глиоксаля. Этиленгликоль, попав в картер, может деградировать до любого из ряда низких органических альдегидов, кислот или диацидов. Кроме того, в дополнение к полимеризации в лаковые соединения эти продукты разложения очень агрессивны к сплавам, содержащим медь и свинец.

Нерастворимые в масле продукты разложения гликоля очень агрессивны к подшипникам даже при низкой концентрации [31].

#### **Потеря дисперсности и засорение фильтра**

Кислоты и вода, образующиеся в масле картера в результате загрязнения охлаждающей жидкостью, часто нарушают диспергируемость сажи даже при низком её содержании. Как только сажа начинает оседать на фильтре, может возникнуть цепная реакция, при этом возникают следующие отказы: потеря противоизносной защиты, липкий осадок на поверхностях клапанной площадки и углеродистые отложения на кольцевых канавках, посадочных площадках днища поршня, компонентах клапанного механизма и масляных каналах к подшипникам и т. д. Затем цепная реакция обретает новую жизнь, поскольку детергенты и диспергаторы, поступающие со свежим моторным маслом, могут мобилизовать шлам и отложения. Затем, через несколько минут после замены масла и фильтра, новый фильтр может снова засориться [32, 33]. Ниже (рисунок 3) приводится краткое изложение этой реакции.

#### **Образование сажи в картере двигателя**

Сажа – это микроскопическая углеродистая частица, являющаяся продуктом неполного сгорания углеводородов (в данном случае дизельного топлива). Сажа состоит из углерода, золы и ненасыщенных (несгоревших) углеводородов. Ненасыщенные углеводороды по существу представляют собой ацетилен и полициклические ароматические углеводороды. Эти компоненты обладают особенно высоким уровнем кислотности и летучести [34 - 36]. Измерения показали, что сажа обычно содержит 90% углерода, 4% кислорода и 3% водорода, а остальное состоит из азота, серы и следов металлов. Было измерено, что отдельные или первичные частицы сажи от сжигания дизельного топлива составляют приблизительно 40 нм. Из-за коллоидных свойств сажи частицы агломерируются максимум примерно до 500 нм, при этом средний размер агломерата сажи составляет 200 нм. Частицы сажи, как правило, более распространены в дизельных двигателях, чем в бензиновых двигателях, из-за

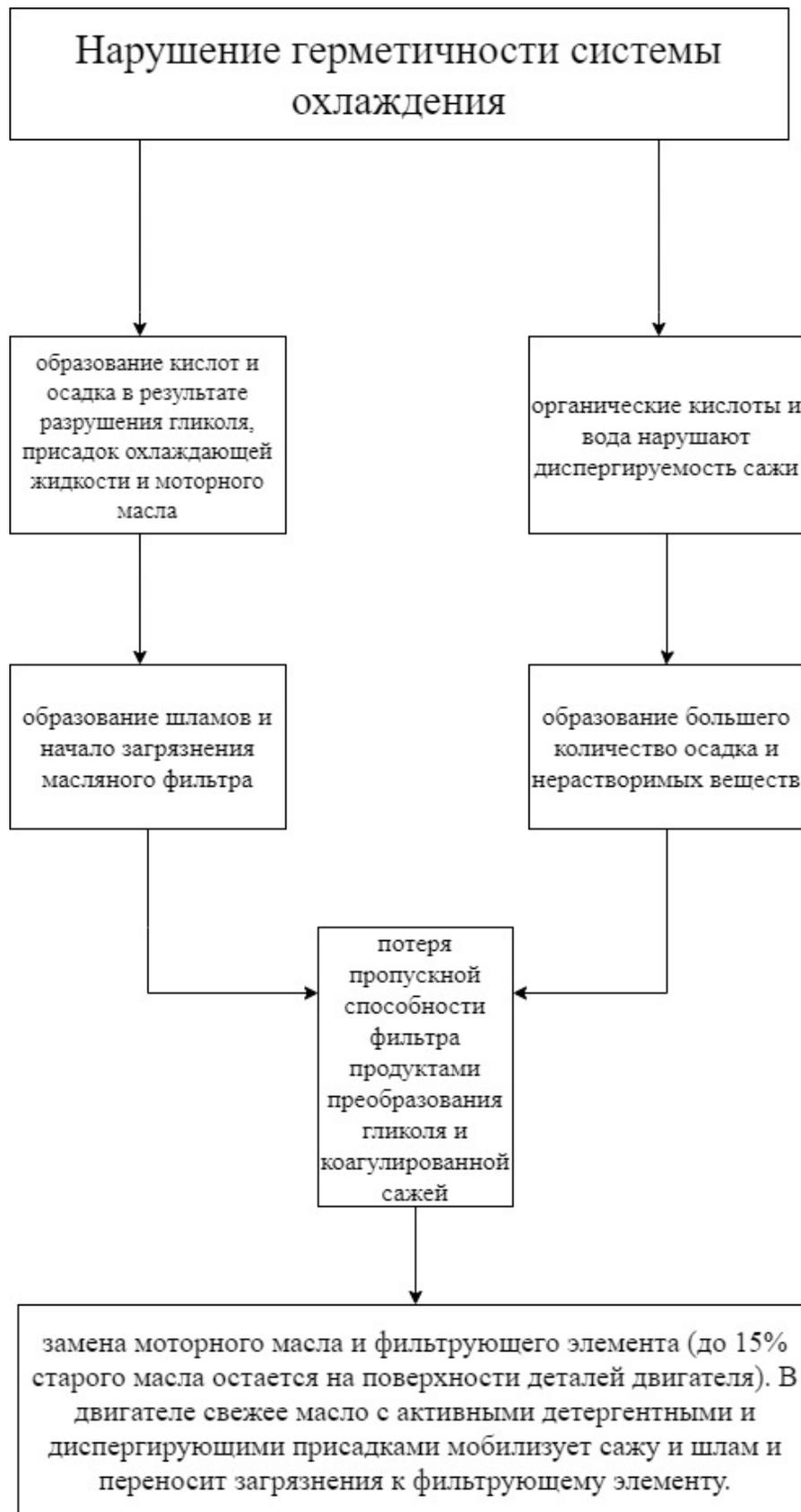


Рисунок 3 – Последствия нарушения герметичности системы охлаждения

Figure 3 – Consequences of a leakage in cooling system

различий в механизмах сгорания. Дизельные двигатели работают при более высоком соотношении воздуха и топлива, но в качестве топлива используются более тяжёлые фракции углеводородов, что, как правило, и приводит к более высокому уровню образования сажи в двигателе. Большинство современных дизельных двигателей работает с использованием прямого впрыска топлива, которое закручивается в камере сгорания для содействия смешиванию топлива и воздуха с образованием однородной рабочей смеси. Возгорание начинается вблизи точки впрыска и происходит очень быстро в виде диффузионного пламени. В этот момент воздух и топливо хорошо перемешиваются, но особенно на переходных режимах смесь очень богата топливом, что приводит к образованию очень высокого уровня сажи. После диффузионного горения этот процесс проходит через остальную часть камеры сгорания путем пиролизного горения, в результате которого медленно сжигается большая часть оставшегося топлива. Это медленное сжигание приводит к образованию большего количества твердых частиц (сажи) и несгоревших углеводородов в конце процесса горения. В процессе горения образуются и разрушаются частицы сажи. Они создаются описанным выше процессом и разрушаются окислением. Окисление – это механизм, который возникает, когда сажа или предшественники сажи вступают в контакт с различными видами окислителей. Когда это происходит, углеводороды, попавшие в сажу, выгорают, и размер частиц уменьшается. Во время стадии процесса диффузионного горения частицы сажи, образующиеся на начальной стадии процесса горения, вступают в контакт с гораздо большим объемом воздуха по сравнению с топливом, и большая часть частиц сажи окисляется. Требуется дальнейшее окисление, чтобы уменьшить количество сажи, окончательно израсходованной. Когда выпускной клапан открывается, продукты сгорания выбрасываются в выхлопную систему, которая содержит больше видов окислителей. Окислительные каталитические нейтрализаторы используются для дальнейшего уменьшения количества сажи, выбрасываемой из выхлопной трубы. Большая часть образующейся сажи окисляется до выхлопа. Возможно, именно поэтому большинство частиц сажи поглощается смазкой и относительно мало расходуется [37, 38].

Концентрация образующихся частиц сажи увеличивается с увеличением соотношения воздуха и топлива. Когда соотношение возду-

ха к топливу приближается к стехиометрическому (14,5 для дизельного топлива), скорость образования сажи резко возрастает. Это связано с тем, что вблизи стехиометрического соотношения в цикле недостаточно времени и кислорода для полного сжигания всего топлива; кроме того, будет низкая доля окисляющих веществ для окисления сажи. Как правило, при значениях 20-процентного обеднения топлива стехиометрически и выше, которые используются в настоящее время, в процессе сгорания образуется чрезмерное количество сажи. Избыток воздуха необходим для повышения эффективности дизельного цикла и снижения выбросов углеводородов. Исследования показали, что сажа, содержащаяся в смазке двигателя, и сажа, выбрасываемая из выхлопной трубы, сильно отличаются. Это может быть частично связано с процессами окисления, через которые проходят продукты сгорания. Как упоминалось выше, сажа, содержащаяся в смазочных материалах, имеет очень высокое содержание углерода и низкое содержание кислорода. Частицы сажи, как правило, считаются чрезвычайно твердыми по отдельности и гораздо более мягкими при агломерации. Сажа, взятая из двигателя, работающего с EGR, немного тяжелее, чем сажа из двигателя без EGR. Это увеличение твердости, возможно, связано с процессом вторичного нагрева и окисления, который испытывают частицы.

Из сажи, образующейся в двигателе, только 29% попадает в атмосферу через выхлопную трубу, а остальная часть оседает на стенках цилиндра и головке поршня. Из сажи, которая остается в двигателе (в основном в смазке), 3% приходится на выбросы газов, остальное происходит в результате соскабливания поршневыми кольцами отложений сажи в цилиндре, которые затем попадают в масляный поддон. Затем она перемещается по двигателю, где сажу можно ввести в контакты подвижных компонентов. Внутри клапанного механизма имеется множество подвижных компонентов, все различной геометрии и движения. Существуют контакты скольжения, качения-скольжения и возвратно-поступательного движения, некоторые из них конформны. Из-за различных движений и нагрузок на каждой границе раздела будут очевидны разные режимы смазки. Это дополнительно усложняется механизмами нанесения смазки, которые варьируются от контактов, где используется положительное смазывание, до тех, где смазка достигает контакта косвенно за счет смазки разбрызгиванием. В некоторых случаях контакты мало смазывают-

ся из-за их расположения, и могут возникнуть проблемы с масляным голоданием; присутствие сажи еще больше усугубит это.

Было предложено три различных механизма износа из-за загрязнения сажей. Раундс [39] постулировал, что химическая адсорбция противоизносных компонентов смазки сажей снижает способность смазки защищать поверхности. Другие исследователи предположили, что износ сажей мог произойти из-за недостатка смазки в контакте. Это когда сажа агломерируется до размеров, превышающих толщину масляной пленки, и блокирует попадание смазки в контакт. Последний предложенный механизм предполагает, что изнашивание поверхностей происходит в результате частичного истирания, при котором сажа действует как третье тело. В качестве агломератов сажа до-

статочно мягкая, но в виде отдельных частиц сажа считается достаточно твердой, чтобы изнашивать металлические поверхности.

Контроль отложений в двигателе является фундаментальной необходимостью для обеспечения длительного срока службы и эффективности работы двигателя. Образование отложений зависит от конструкции двигателя, условий эксплуатации, технического обслуживания, типа топлива и сгорания, а также от характеристик масла. Отложения влияют на мощность двигателя и его производительность, износ, шум, плавность, экономичность, срок службы и стоимость обслуживания [40, 41]. Наглядно усугубляющее воздействие загрязненных моторных масел на детали двигателя можно продемонстрировать с помощью рисунков 4 и 5.

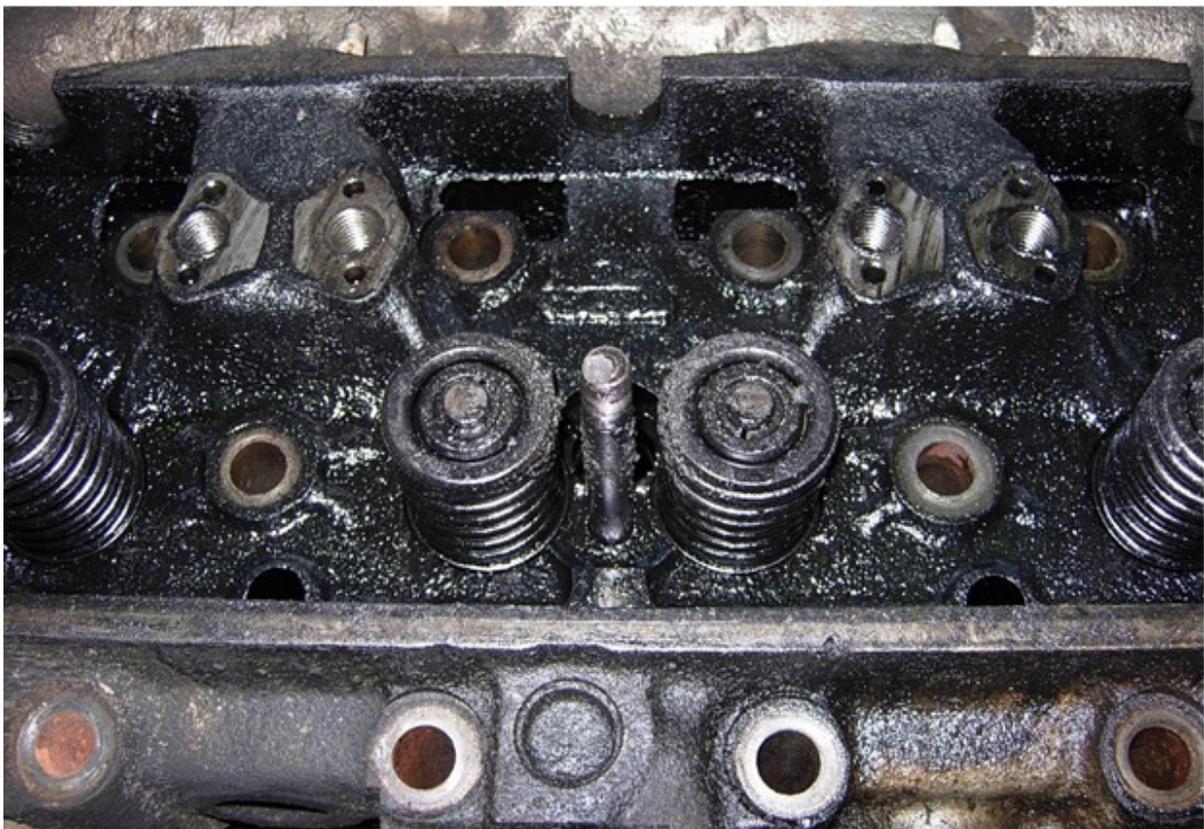


Рисунок 4 – Отложения на поверхностях головок блока цилиндров

Figure 4 – Sediments on cylinder head surfaces

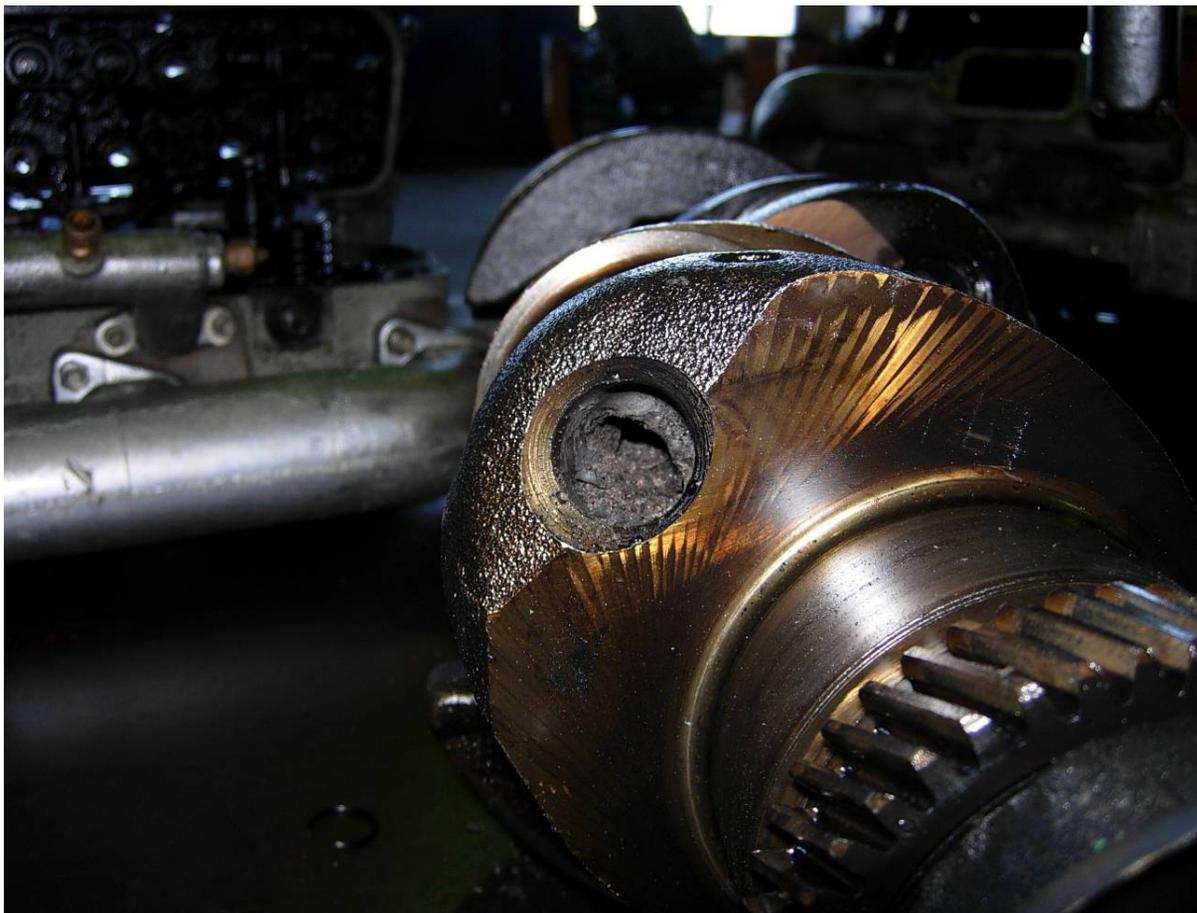


Рисунок 5 – Отложения в ловушке коленчатого вала двигателя

Figure 5 – Deposits trapped in the engine crankshaft

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе приведена классификация загрязнений моторного масла дизельных двигателей по агрегатному состоянию.

2. Рассмотрены пути попадания загрязнений в моторные масла дизельных двигателей.

3. Приведены результаты воздействия загрязнений на состояние дизельных двигателей и рассмотрены механизмы воздействия жидких загрязнений на детали двигателей.

4. При возникновении шлама, вода и охлаждающая жидкость являются существенным фактором, в целом любое состояние, которое способствует проникновению и удержанию воды в моторном масле, способствует и образованию шлама.

5. Работавшее масло из двигателя внутреннего сгорания поршневого типа представляет собой смесь продуктов сильного окисления углеводородов. Изменения в масле

особенно характерны для дизельных двигателей, где масло после эксплуатации содержит такие продукты глубокой окислительной конверсии, как нагар и смолистые вещества. Изменение температуры масла в картере в пределах всего 80–145 °С уже дает начальную степень окисления. Если объем системы смазки двигателя уменьшается, то концентрация продуктов окисления в масле увеличивается.

6. При окислении и старении смазочного материала образуются кислые побочные продукты в результате химического разложения базовой основы и присадок в присутствии воздуха и тепла. Высокая концентрация кислотных соединений в смазочном материале может привести к коррозии деталей машин из-за загрязненного масла, нарушению работы фильтров из-за образования лака и шлама. Это приводит к образованию отложений на большинстве поверхностей двигателя, включая такие, которые могут вызвать залипание поршневых колец в их канавках.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Al S. O. A., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160. 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
2. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. vol. 40. 2019. pp. 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>
3. Heredia-Cancino J. A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M. E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*. 2018. 124: 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>
4. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>
5. Deulgaonkar V. R., Ingolikar N., Borkar A., Ghute S., Awate N. Failure analysis of diesel engine piston in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. 120: 105008, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105008>.
6. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. 129: 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>
7. Sun Z., Wang Y., Yuan Ch. Influence of oil deposition on the measurement accuracy of a calorimetric flow sensor. *Measurement*. 2021. 185: 110052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110052>.
8. Bagi S., Sharma V., Aswath P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. 136: 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>.
9. Raposo H., Farinha J.T, Fonseca I., Galar D..Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*. 2019. 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>.
10. Vaitkunaite G., Espejo C., Wang Ch., Thiébaud B., Charrin C., Neville A., Morina A.. MoS<sub>2</sub> tribofilm distribution from low viscosity lubricants and its effect on friction. *Tribology International*. 2020. 151: 106531. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106531>.
11. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020. 50: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>.
12. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A. A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019. 355: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>.
13. Wang Y., Chen Yu, Liang X., Tan P., Deng S. Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*. 2021. 225: 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.047>.
14. Vrcek A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.
15. Laad M., Jatti V. K. S. Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. 30: 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.008>.
16. Li D., Kong N., Zhang B., Zhang Bo, Li R., Zhang Q. Comparative study on the effects of oil viscosity on typical coatings for automotive engine components under simulated lubrication conditions. *Diamond and Related Materials*. 2021. 112: 108226. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108226>.
17. Zhang W., Zhang Z., Ma X., Awad O. I., Shuai Y.Li, S, Xu H. Impact of injector tip deposits on gasoline direct injection engine combustion, fuel economy and emissions. *Applied Energy*. 2020. 262 : 114538. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114538>.
18. Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*. 2019. 138: 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>.
19. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO<sub>2</sub> and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.
20. Burke R.D., Madamedon M., Williams R. Newly identified effects of injector nozzle fouling in diesel engines. *Fuel*. 2020. 278:118336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118336>.
21. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. *Science of The Total Environment*. 2020. 748: 141249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141249>.
22. Qian Y., Li Z., Yu L., Wang X., Lu X. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy*. 2019. 238: 1269-1298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.179>.
23. Sujesh G., Ramesh S. Modeling and control of diesel engines: A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. 57: 4033-4048. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.011>.
24. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.
25. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

26. Xu H.T., Luo Z.Q., Wang N., Qu Z.G., Chen J., An L. Experimental study of the selective catalytic reduction after-treatment for the exhaust emission of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 2019. 147: 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.067>.

27. Haas F. M., Won S. H., Dryer F. L., Pera C. Lube oil chemistry influences on autoignition as measured in an ignition quality tester. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. 37:4645-4654. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.165>.

28. Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*. 2018. 225: 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>.

29. Abián M., Martín C., Nogueras P., Sánchez-Valdepeñas J., Rodríguez-Fernández J., Lapuerta M., Alzueta M. U. Interaction of diesel engine soot with NO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> at diesel exhaust conditions. Effect of fuel and engine operation mode. *Fuel*. 2018. 212: 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.025>.

30. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Raverkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

31. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

32. Hu C., You G., Liu J., Du Sh., Zhao X., Wu S. Study on the mechanisms of the lubricating oil antioxidants: Experimental and molecular simulation. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. 324:115099. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115099>.

33. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

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

35. Temizer I., Cihan O. Experimental and numerical evaluation of combustion analysis of a DI diesel engine. *Energy Reports*. 2021. 7: 5549-5561. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.192>.

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

37. Остриков В.В., Афоничев Д.Н., Оробинский В.И., Балабанов В.И. Удаление продуктов старения

из работающих моторных масел без их слива из картеров двигателей машин // Химия и технология топлив и масел. 2020. № 3. С. 18-21.

38. Утаев С.А. Закономерности накопления загрязняющих примесей моторных масел в процессе эксплуатации двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2. С. 207-214.

39. Зазуля А.Н., Белов С.А. Изменение свойств моторного масла во время эксплуатации в дизельном двигателе // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. 2020. № 1. С. 5-8.

40. Остриков В.В., Сазонов С.Н., Афоничев Д.Н., Козлов В.Г. Изменение вязкости моторного масла как показатель технического состояния двигателя внутреннего сгорания и свойств смазочного материала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 3. С. 54-61.

41. Бусин И.В., Остриков В.В., Корнев А.Ю. Технология очистки работающего моторного масла от продуктов старения // Наука в центральной России. 2015. № 3 (15). С. 82-87.

42. Корнеев С.В., Пашукевич С.В. Влияние воды на изменение показателей качества моторного масла // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 4 (80). С. 406-415.

## REFERENCES

1. Al S. O. A., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160. 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>

2. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. 40. 2019: 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>

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

4. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>

5. Deulgaonkar V. R., Ingolikar N., Borkar A., Ghute S., Awate N. Failure analysis of diesel engine piston in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. 120: 105008, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105008>.

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

7. Sun Z., Wang Y., Yuan Ch. Influence of oil deposition on the measurement accuracy of a calorimetric

flow sensor. *Measurement*. 2021. 185: 110052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110052>.

8. Bagi S., Sharma V., Aswath P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. 136: 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>.

9. Raposo H., Farinha J.T, Fonseca I., Galar D..Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*. 2019. 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>.

10. Vaitkunaite G., Espejo C., Wang Ch., Thiébaud B., Charrin C., Neville A., Morina A.. MoS<sub>2</sub> tribofilm distribution from low viscosity lubricants and its effect on friction. *Tribology International*. 2020. 151: 106531. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106531>.

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

12. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A. A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019. 355: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>.

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

14. Vrcek A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.

15. Laad M., Jatti V. K. S. Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. 30: 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.008>.

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

17. Zhang W., Zhang Z., Ma X., Awad O. I., Shuai Y.Li, S, Xu H. Impact of injector tip deposits on gasoline direct injection engine combustion, fuel economy and emissions. *Applied Energy*. 2020. 262 : 114538. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114538>.

18. Tormos B., Pla B., Bastidas S., Ramírez L., Pérez T. Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions. *Tribology International*. 2019. 138: 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.042>.

19. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO<sub>2</sub> and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.

20. Burke R.D., Madamedon M., Williams R. Newly identified effects of injector nozzle fouling in diesel engines. *Fuel*. 2020. 278:118336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118336>.

21. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. *Science of The Total Environment*. 2020. 748: 141249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141249>.

22. Qian Y., Li Z., Yu L., Wang X., Lu X. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Applied Energy*. 2019. 238: 1269-1298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.179>.

23. Sujesh G., Ramesh S. Modeling and control of diesel engines: A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. 57: 4033-4048. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.011>.

24. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.

25. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

26. Xu H.T., Luo Z.Q., Wang N., Qu Z.G., Chen J., An L. Experimental study of the selective catalytic reduction after-treatment for the exhaust emission of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. 2019. 147: 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.067>.

27. Haas F. M., Won S. H., Dryer F. L., Pera C. Lube oil chemistry influences on autoignition as measured in an ignition quality tester. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. 37:4645-4654. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.165>.

28. Kalghatgi G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*. 2018. 225: 965-974. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>.

29. Abián M., Martín C., Nogueras P., Sánchez-Valdepeñas J., Rodríguez-Fernández J., Lapuerta M., Alzueta M. U. Interaction of diesel engine soot with NO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> at diesel exhaust conditions. Effect of fuel and engine operation mode. *Fuel*. 2018. 212: 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.025>.

30. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Raverkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

31. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

32. Hu C., You G., Liu J., Du Sh., Zhao X., Wu S. Study on the mechanisms of the lubricating oil antioxidants: Experimental and molecular simulation.

*Journal of Molecular Liquids*. 2021. 324:115099. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115099>.

33. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

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

35. Temizer I., Cihan O. Experimental and numerical evaluation of combustion analysis of a DI diesel engine. *Energy Reports*. 2021. 7: 5549-5561. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.192>.

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

37. Ostrikov V.V., Afonichev D.N., Orobinskij V.I., Balabanov V.I. Uдалenie produktov stareniya iz rabotayushhix motorny`x masel bez ix sliva iz karterov dvigatelej mashin [Removal of aging products from working motor oils without draining them from crankcases of machine engines]. *Ximiya i texnologiya topliv i masel*, 2020, 3:18-21.

38. Utaev S.A. Zakonomernosti nakopleniya zagryaznyayushhix primesej motorny`x masel v processe e`kspluatatsii dvigatelej [Patterns of

accumulation of contaminants in engine oils during engine operation]. *Sovremenny`e materialy`, texnika i texnologii*, 2016, 2: 207-214.

39. Zazulya A.N., Belov S.A. Izmenenie svojstv motornogo masla vo vremya e`kspluatatsii v dizel`nom dvigatele [Changes in the properties of engine oil during operation in a diesel engine]. *Sovremenny`e metody` texnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushhego kontrolya detalej i uzlov*, 2020, 1: 5-8.

40. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Afonichev D.N., Kozlov V.G. Izmenenie vyazkosti motornogo masla kak pokazatel` texnicheskogo sostoyaniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya i svojstv smazochного материала [Changing the viscosity of engine oil as an indicator of the technical condition of the internal combustion engine and the properties of the lubricant]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, 3: 54-61.

41. Busin I.V., Ostrikov V.V., Kornev A.Yu. Texnologiya ochistki rabotayushhego motornogo masla ot produktov stareniya [Technology for cleaning running engine oil from aging products]. *Nauka v central`noj Rossii*, 2015, 3: 82-87.

42. Korneev S.V., Pashukevich S.V. Vliyanie vody` na izmenenie pokazatelej kachestva motornogo masla [The influence of water on the change in engine oil quality indicators]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2021, 4: 406-415.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пашукевич Софья Вячеславовна – аспирант.

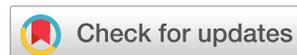
## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sofia V. Pashukevich – Postgraduate student of the Chemistry and Chemical Technology Department.

**РАЗДЕЛ III.  
СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.  
CONSTRUCTION  
AND ARCHITECTURE**



## ВОДО- И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА, ПРИГОТОВЛЕННОГО НА БИТУМЕ, МОДИФИЦИРОВАННОМ СЭВИЛЕНОМ

**В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина\*, А.М. Гридчин**

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

[vvya@intbel.ru](mailto:vvya@intbel.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,  
[navsvetlala685@rambler.ru](mailto:navsvetlala685@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5040-3655>,  
[prezident@intbel.ru](mailto:prezident@intbel.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0264-7751>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время повышение долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий является одной из актуальных задач, решение которой обеспечивает значительный экономический эффект, достигаемый за счет увеличения межремонтных сроков, а также общего срока службы автомобильных дорог. Асфальтобетонные покрытия при длительном увлажнении вследствие ослабления структурных связей могут разрушаться за счёт выкрашивания минеральных зёрен, что приводит к повышенному износу покрытий и образованию выбоин. Вода проникает в микродофекты структуры асфальтобетона, приводя к снижению прочности материала. В результате снижается коррозионная стойкость асфальтобетона. Для повышения качества вяжущего и долговечности асфальтобетонного покрытия, в частности из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА), используют различные модифицирующие добавки, в том числе полимерные.

В связи с этим перспективным направлением представляется использование полимеров, содержащих активные группы, которые способны обеспечить повышение адгезии к минеральным материалам, в том числе из кислых пород, а следовательно, и водостойкость. Одним из таких является сополимер этилена с винилацетатом (СЭВА).

**Материалы и методы.** С целью изучения влияния сэвилена на водо- и морозостойкость асфальтобетонных смесей были приготовлены щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси на основе модифицированных сэвиленом битумов. В качестве исходного битума при приготовлении модифицированных вяжущих был использован БНД 70/100 Московского НПЗ. Были проведены испытания щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей на показатель содержания воздушных пустот по ГОСТ Р 58406.8.2019, коэффициент водостойкости по ГОСТ Р 58401.18–2019 и морозостойкость по ГОСТ 12801–98.

**Результаты.** Установлено, что содержание воздушных пустот образцов асфальтобетона значительно снижается при увеличении концентрации сэвилена, что в дальнейшем будет способствовать более высокой морозостойкости дорожного покрытия. Показано, что применение сэвилена с 22% винилацетата позволяет повысить коэффициент водостойкости асфальтобетонных смесей благодаря наличию полярных молекул в составе этиленвинилацетата, активно взаимодействующих с минеральными составляющими асфальтобетонной смеси. Применение сэвилена улучшает морозостойкость асфальтобетонных образцов. Так, наименьшее снижение прочности в испытаниях на морозостойкость показали образцы с 5% сэвилена.

Установлено, что наибольшей стойкостью к влажностному и температурному воздействию окружающей среды обладают полимерасфальтобетоны на основе вяжущего с сэвиленом, содержащим 22% винилацетата, что соответствует максимальной основности полимера.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** щебеночно-мастичный асфальтобетон, сэвилен, модифицированный битум, водостойкость, морозостойкость, винилацетат, вяжущее, адгезия, винилацетат, воздушные пустоты

Статья поступила в редакцию 29.12.2021; одобрена после рецензирования 24.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Конфликт интересов отсутствует.

© Ядыкина В.В., Наволокина С.Н., Гридчин А.М., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Ядыкина В.В. Водо- и морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном севиленом / В.В. Ядыкина, С.Н. Наволокина, А.М. Гридчин // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-19-1-102-113>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113>  
Original article

## WATER- AND FROST-RESISTANCE OF CRUSHED STONE MASTIC ASPHALT CONCRETE PREPARED ON SEVILEN-MODIFIED BITUMEN

Valentina V. Yadykina, Svetlana N. Navolokina\*, Anatoly M. Gridchin

Shukhov Belgorod State Technological University,  
Belgorod, Russia

[vvya@intbel.ru](mailto:vvya@intbel.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,

[navsvetlala685@rambler.ru](mailto:navsvetlala685@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5040-3655>,

[prezident@intbel.ru](mailto:prezident@intbel.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0264-7751>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, increasing the durability of road asphalt concrete pavements is one of the urgent issues, the solution of which provides a significant economic effect achieved by increasing the turnaround time, as well as the overall service life of highways. Asphalt concrete pavements with prolonged wetting due to weakening of structural bonds can be destroyed due to crumbling of mineral grains, which leads to increased wear of the pavement and the formation of potholes. Water penetrates into micro defects in the structure of asphalt concrete, leading to a decrease in the strength of the material. As a result, the corrosion resistance of asphalt concrete is reduced. To improve the quality of the binder and the durability of the asphalt concrete pavement, in particular from crushed stone-mastic asphalt concrete (SMA), various modifying additives, including polymer ones, are used. In this regard, a promising direction is the use of polymers containing active groups, which are able to provide an increase in adhesion to mineral materials, including those from acid rocks, and, consequently, water resistance. One of these is the ethylene vinyl acetate copolymer (EVAC).

**Materials and methods.** In order to study the effect of sevilen on the water and frost resistance of asphalt concrete mixtures, crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures were prepared based on bitumen modified with БНД 70/100 sevilen made in the Moscow Oil Refinery Plant was used as the initial bitumen in the preparation of modified binders. Tests of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures were carried out for the indicator of the content of air voids in accordance with GOST R 58406.8.2019, the coefficient of water resistance in accordance with GOST R 58401.18-2019 and frost resistance in accordance with GOST 12801-98.

**Results.** It has been established that the content of air voids in asphalt concrete samples significantly decreases with an increase in the concentration of sevilene, which will further contribute to a higher frost resistance of the road surface. It is shown that the use of sevilen with 22% vinyl acetate makes it possible to increase the coefficient of water resistance of asphalt concrete mixtures due to the presence of polar molecules in the composition of ethylene vinyl acetate, actively interacting with the mineral components of the asphalt concrete mixture. The use of sevilen improves the frost resistance of asphalt concrete samples. So, the smallest decrease in strength in tests for frost resistance was shown by samples with 5% sevilene. It was found that polymer asphalt concrete based on binder with sevilene containing 22% vinyl acetate, which corresponds to the maximum basicity of the polymer, has the highest resistance to humidity and temperature effects of the environment.

**KEYWORDS:** crushed stone-mastic asphalt concrete, sevilen, modified bitumen, water resistance, frost resistance, vinyl acetate, binder, adhesion, vinyl acetate, air voids

The article was submitted 29.12.2021; approved after reviewing 24.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.

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: Yadykina V.V., Navolokina S.N., Gridchin A.M. Water- and frost-resistance of crushed stone mastic asphalt concrete prepared on sevilen-modified bitumen. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-102-113>

© Yadykina V.V., Navolokina S.N., Gridchin A.M., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость структуры щебеночно-мастичного асфальтобетона в условиях изменяющегося влажностного и температурного режимов является важным свойством, определяющим долговечность материала. ЩМА, как и большинство других пористых строительных материалов, разрушается главным образом при длительном увлажнении, а также в результате попеременного замораживания – оттаивания [1, 2].

Во многих регионах особенно актуально увеличение водо- и морозостойкости, так как в осенне-зимний и весенний периоды наблюдаются многократные колебания положительных и отрицательных температур при интенсивном выпадении осадков.

Асфальтобетонные покрытия при длительном увлажнении вследствие ослабления структурных связей могут разрушаться за счет выкрашивания минеральных зерен, что приводит к повышенному износу покрытий и образованию выбоин<sup>1,2</sup>. Особенно разрушительно вода действует при попеременном замораживании и оттаивании. Вода, проникая в поры материала, способствует отслаиванию битумных пленок, что приводит к ослаблению структурных связей в асфальтобетоне. Расклинивающий эффект от действия воды при замерзании усиливает этот процесс. При понижении температуры битумные пленки становятся хрупкими, а вода увеличивается в объеме при замерзании, вызывая большие напряжения в стенках пор, способные привести к возникновению микротрещин. Эти микротрещины при оттаивании заполняются водой и в дальнейшем могут развиваться, чему способствует проникающая в них вода. Таким образом, одновременное воздействие воды и пониженных температур оказывает неблагоприятное воздействие на асфальтобетон.

Показатели прочности и водостойкости асфальтобетона в значительной степени зависят от свойств применяемых вяжущих и минеральных материалов. Наиболее характерные разрушения асфальтобетонных покрытий, связанные с их недостаточной водостойкостью, обусловлены отсутствием прочного сцепления битума с поверхностью минерального материала, особенно при использовании заполнителей из кислых горных пород.

Для повышения качества вяжущего и долговечности асфальтобетонного покрытия, в частности из ЩМА, используют различные модифицирующие добавки, в том числе полимерные. Наибольшее распространение получили термоэластопласты на основе стирол-бутадиен стирола (СБС). Они позволяют снизить колееобразование, повысить сдвигоустойчивость и трещиностойкость, сопротивление усталостному разрушению покрытий автомобильных дорог.

В то же время одним из ведущих факторов долговечности покрытий является их водостойкость, формирующаяся за счет устойчивого к действию воды контакта между вяжущим и твердой подложкой – поверхностью каменных материалов [3, 4, 5, 6]. Как справедливо отмечено В. А. Золотаревым, сведений об устойчивости асфальтобетонов на битумах, модифицированных полимерами (асфальтополимербетонов), против разрушающего действия воды недостаточно, а имеющиеся сведения достаточно противоречивы [7]. С тех пор в области исследования влияния полимеров в составе вяжущего на водостойкость асфальтобетона существенных изменений не произошло.

В работе [8] проведено сравнение влияния полимеров разных видов на сцепление битумов разных марок, технологий получения и происхождения с поверхностью стекла на свойства модифицированного вяжущего и водостойкость полимерасфальтобетона. С учетом сведений, приведенных в работах [3, 7], сделан вывод об отсутствии взаимодействия СБС с поверхностью каменных материалов и о малом вкладе полимеров при традиционно применяемых концентрациях в формирование водоустойчивости асфальтополимербетонов. Наблюдающийся эффект повышения устойчивости обусловлен замедлением диффузии воды сквозь пленку битумополимерных вяжущих. Для повышения водоустойчивости рекомендуется введение поверхностно-активных веществ или использование специальных адгезионно-активированных полимеров. Однако высказано сомнение по поводу эффективности использования ПАВ в связи с тем, что в битумах, модифицированных полимерами, образуется совместная с асфальтенами структура, которая может затруднять диффузию

<sup>1</sup> Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков: Высш. шк. 1977.

<sup>2</sup> Печеный Б. Г. Долговечность битумных и битумо-минеральных покрытий. М.: Стройиздат. 1981. 123 с.

молекул ПАВ к границе раздела фаз при их взаимодействии с каменными материалами.

В связи с этим перспективным направлением представляется использование полимеров, содержащих активные группы, которые способны обеспечить повышение адгезии к минеральным материалам, в том числе из кислых пород, а следовательно, и водостойкость. Одним из таких является сополимер этилена с винилацетатом (СЭВА). Поверхность СЭВА имеет преимущественно основной характер, поскольку в состав полимера входит карбонильная группа, обладающая основными свойствами вследствие большей электроотрицательности атома кислорода по сравнению с углеродом<sup>3</sup>. Это должно положительно отразиться на взаимодействии органического вяжущего, модифицированного сэвиленом, с заполнителями из кислых пород в отличие от традиционного ПБВ на СБС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с использованием традиционных методик и оборудования. С целью изучения влияния сэвилена на свойства асфальтобетонных смесей были приготовлены щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси на основе модифицированных сэвиленом битумов. В качестве исходного битума при приготовлении модифицированных вяжущих был использован БНД 70/100 Московского НПЗ.

Применялась добавка, содержащая 22 и 29% винилацетата (ВА). Ее концентрация в битуме составляла 3, 5, 7 и 10%. Для сравнения в качестве вяжущего было использовано ПБВ 60 производства ООО «Техпрогресс», содержащее 3% СБС.

Испытания щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей на показатель содержания воздушных пустот проводились по ГОСТ Р 58401.8–2019, коэффициент водостойкости – по ГОСТ 58401.18–2019 и морозостойкости – по ГОСТ 12801–98. Водостойкость опреде-

ляли как отношение предела прочности при непрямом растяжении серии образцов после воздействия воды и цикла «замораживание – оттаивание», и предела прочности при непрямом растяжении серии образцов, выдержанных на воздухе при температуре  $(22\pm 3)$  °С. Предел прочности определяли на прессе ДТС-06-50/100. Морозостойкость образцов ЩМА-16 оценивали по изменениям физико-механических показателей образцов после 5...75 циклов попеременного замораживания – оттаивания.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Известно<sup>4,5</sup> [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] положительное влияние сэвилена на характеристики битума и асфальтобетона.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния сэвилена на водо- и морозостойкость ЩМА-16. На рисунке 1 представлено изменение водостойкости образцов ЩМА-16 в результате применения битума, модифицированного сэвиленом.

Из результатов видно, что применение вяжущего, модифицированного сэвиленом, положительно отражается на водостойкости асфальтобетона. Причем коэффициент водостойкости повышается не только по сравнению с применением немодифицированного битума, но и традиционного ПБВ на СБС. Коэффициент водостойкости образцов ЩМА растет пропорционально содержанию сэвилена в составе вяжущего. Кроме того, показатель водостойкости образцов с 22% винилацетата заметно выше, чем с 29% винилацетата.

Известно, что определяющее влияние на водостойкость асфальтобетона оказывает сцепление вяжущего с поверхностью каменных материалов. Лучшие результаты по показателю водостойкости и водонасыщения образцов ЩМА на битуме, модифицированном сэвиленом с 22% винилацетата по сравнению с 29% ВА можно объяснить более высоким сцеплением модифицированного вяжущего с минеральной частью асфальтобетонной смеси.

<sup>3</sup> Старостина И. А., Стоянов О. В. Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл-полимерных системах: монография. КГТУ. Казань. 2010. 195 с.

<sup>4</sup> Опанасенко О. Н. Регулирование межфазных взаимодействий в нефтяных дисперсиях поверхностно-активными веществами и полимерами: автореф. дис. д-ра хим. наук. Минск. 2017. 48 с.

<sup>5</sup> Галдина В. Д. Модифицированные битумы: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2009. 228 с.

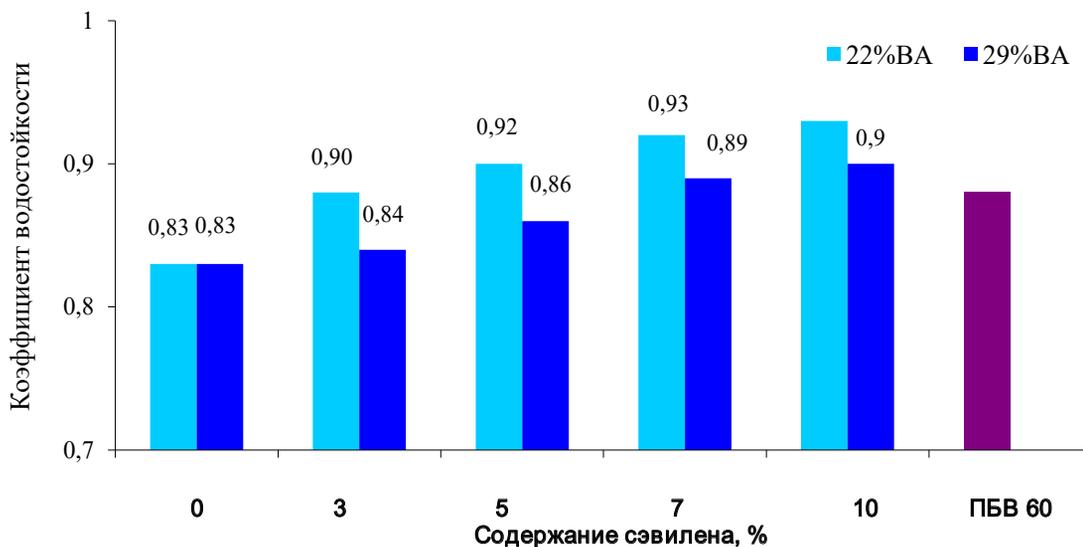


Рисунок 1 – Коэффициент водостойкости ЦМА на битуме, модифицированном сэвиленом с 22 ВА и 29 ВА

Figure 1 – SMA water resistance coefficient on bitumen modified with sevilen with 22VA and 29VA

Исследованиями<sup>6,7</sup> установлено, что значительную роль в образовании адгезионных связей на различных поверхностях раздела оказывают межмолекулярные кислотно-основные взаимодействия. В работе [19] показано, что максимальную основность имеет поверхность исследуемого полимера, содержащего 20–22% винилацетатных групп, что и обеспечило наилучшие показатели сцепления, а следовательно и водостойкости асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном сэвиленом, содержащим 22% винилацетата.

Кроме того, установлено, что вязкость битума, содержащего сэвилен с 22% ВА, выше, чем с 29% ВА [12]. Это способствует лучшему сохранению битумной пленки на поверхности минеральных материалов и повышению водостойкости ЦМА на модифицированном битуме.

Улучшение сцепления может быть связано также с изменением строения макромолекул СЭВА [19].

Высказанные предположения подтверждены результатами исследований по сцеплению исследуемых вяжущих с гранитным щебнем.

Как и следовало ожидать, сцепление исходного вяжущего и ПБВ 60 на СБС значительно ниже, чем битума, модифицированного сэвиленом (рисунок 2), что связано с наличием активных групп на поверхности сэвилена. Показатели водостойкости коррелируют со сцеплением. Так, коэффициент водостойкости образцов ЦМА на ПБВ 60 составляет 0,88, что сопоставимо с аналогичным показателем при использовании 3% СЭВА и ниже, чем при введении 5–10% добавки.

При исследовании содержания воздушных пустот образцов ЦМА на модифицированном вяжущем наблюдается закономерная тенденция (рисунок 3).

Как и следовало ожидать, содержание воздушных пустот образцов при использовании сэвилена, содержащего 22% винилацетата, ниже по сравнению с 29%. При концентрации

<sup>6</sup> Старостина И. А., Стоянов О. В. Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл-полимерных системах: монография. КГТУ. Казань. 2010. 195 с.

<sup>7</sup> Старостина И. А. Кислотно-основные взаимодействия полимеров и металлов в адгезионных соединениях: автореф. дис. д-р хим. наук. Казань. 2011. 38 с.

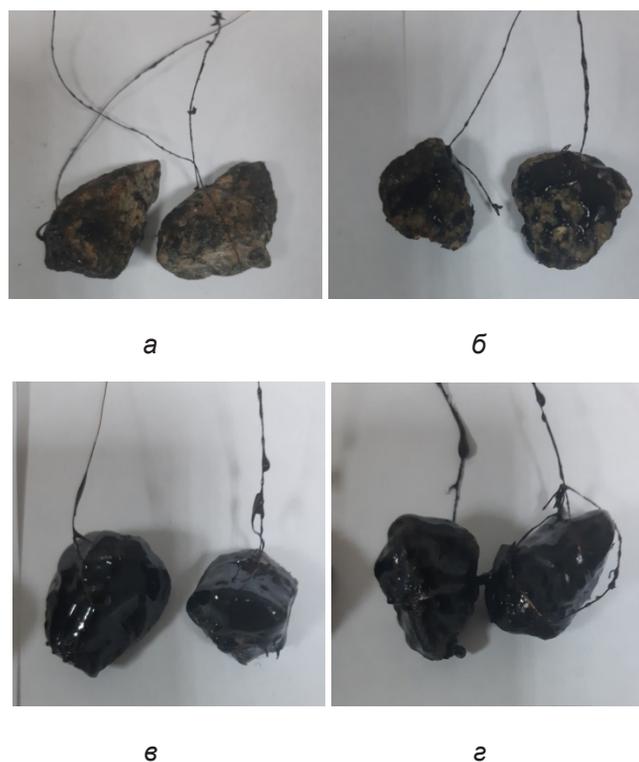


Рисунок 2 – Сцепление вяжущего с минеральным материалом:  
а – битум исходный; б – с ПБВ 60; в – с 5% СЭВА (22% ВА); г – с 5% СЭВА (29% ВА)

Picture 2 – Adhesion of the binder to mineral material:  
1 – initial bitumen; 2 – with MSDS of 60; 3 – with 5% EVAC (22% VA); 4 – with 5% EVAC (29% VA)

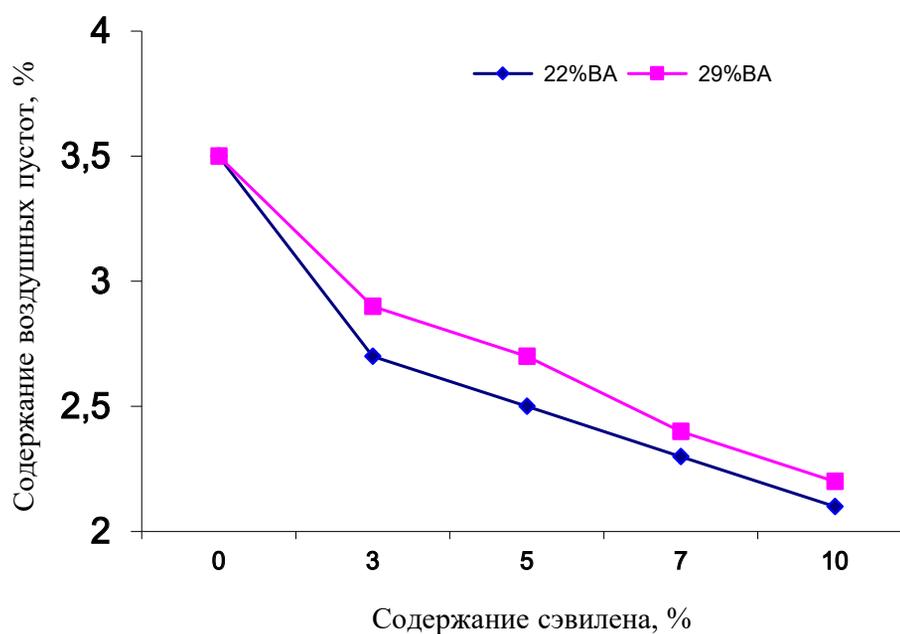


Рисунок 3 – Содержание воздушных пустот в ЩМА на битуме, модифицированном сэвиленом с 22 ВА и 29 ВА

Figure 3 – Content of air voids in SMA on bitumen modified with Sevilen with 22VA and 29VA

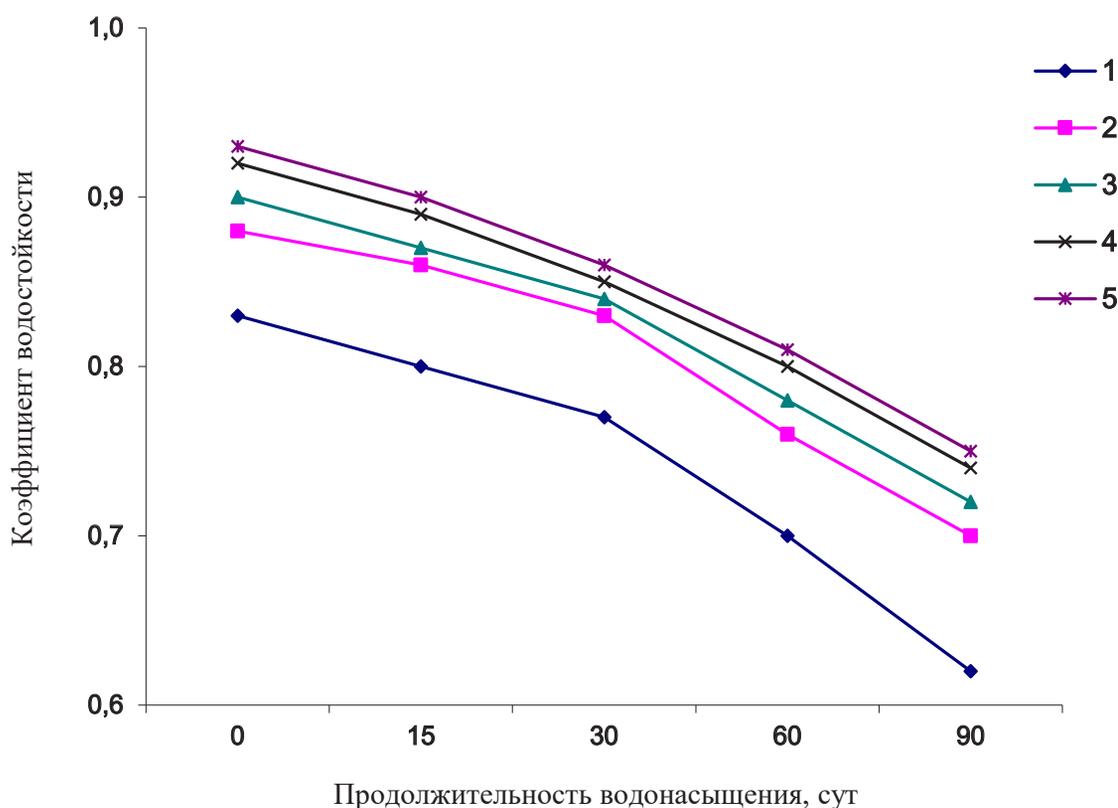


Рисунок 4 – Изменение водостойкости ЩМА-16 с сэвиленом при длительном водонасыщении: 1 – 0% СЭВА; 2 – 3% СЭВА; 3 – 5% СЭВА; 4 – 7% СЭВА; 5 – 10% СЭВА

Figure 4 – Change in water resistance of SMA-16 with sevelen at long-term water saturation: 1 – 0% EVAC; 2 – 3% EVAC; 3 – 5% EVAC; 4 – 7% EVAC; 5 – 10% EVAC

ях 3, 5, 7 и 10% уменьшение показателя составляет 22,8, 28,6, 34,2 и 40%. Содержание воздушных пустот образцов асфальтобетона значительно снижается при увеличении концентрации сэвилена, следовательно, этот композит содержит большее количество закрытых пор, что в дальнейшем будет способствовать более высокой морозостойкости дорожного покрытия.

Известно, что критерием водостойкости полимерасфальтобетона, как и асфальтобетона, является коэффициент длительной водостойкости [8]. Поэтому были определены значения коэффициента водостойкости через 15, 30, 60 и 60 сут водонасыщения.

Из рисунка 4 видно, что коэффициент водостойкости ЩМА особенно активно снижается после 30 сут испытаний, причем снижение

показателя без добавки более интенсивное. Через 90 сут водонасыщения коэффициент водостойкости образцов с 3, 5, 7 и 10% сэвилена падает на 20,5, 20, 19,6 и 19,3 % соответственно, тогда как на немодифицированном вяжущем – на 25,3%.

Таким образом, использование вяжущего, модифицированного сэвиленом, значительно повышает его сцепление с минеральными материалами, что положительно отражается на показателях содержания воздушных пустот и водостойкости асфальтобетона.

В большой степени долговечность покрытия зависит от морозостойкости. В результате попеременного замораживания – оттаивания структура асфальтобетона может разрушаться, поэтому устойчивость структуры щебеночно-мастичного асфальтобетона в условиях

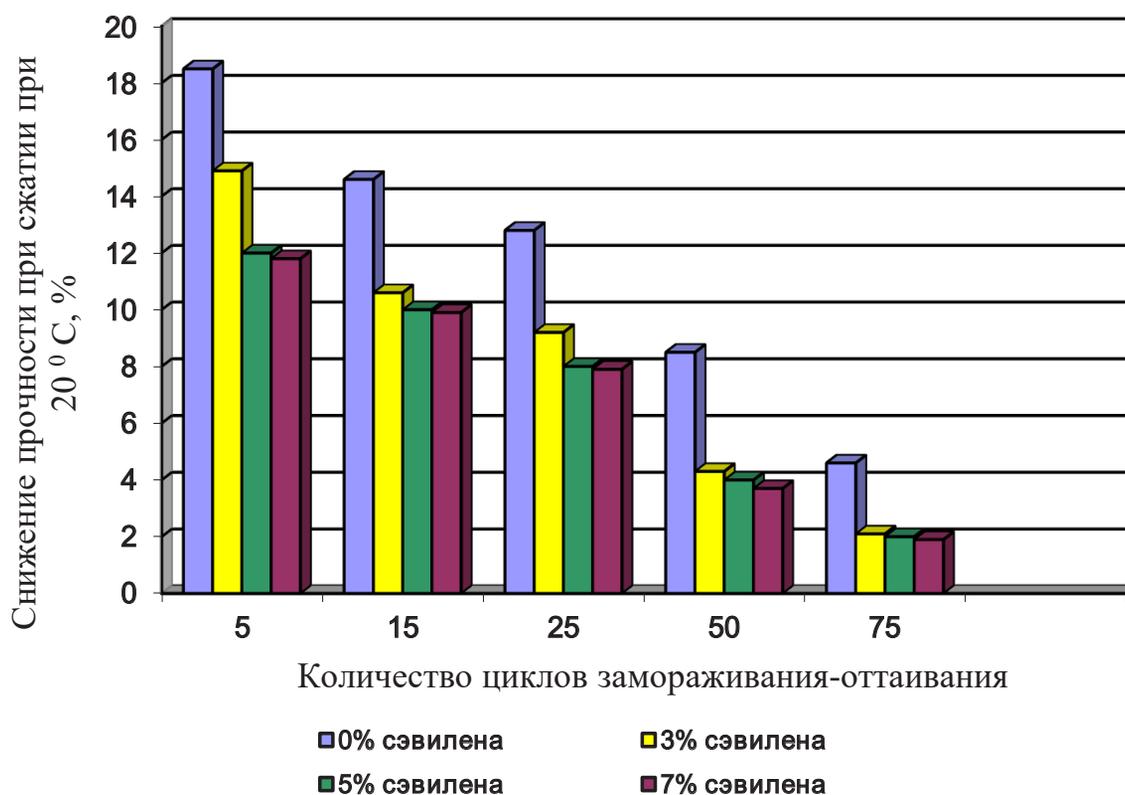


Рисунок 5 – Снижение прочности образцов с сэвиленом, содержащим 22 ВА, при 20 °С при замораживании – оттаивании

Figure 5 – Decreased strength of specimens with 22VA sevilen at 20°C during freeze-thaw

влажностного и температурного воздействия является важным фактором повышения его долговечности.

В порах асфальтобетона происходит взаимодействие воды с материалом. Вода, характеризующаяся более высокой диэлектрической постоянной по сравнению с малополярными соединениями битума, более интенсивно взаимодействует с гидрофильными центрами поверхности минеральных материалов. При длительном воздействии воды происходит адсорбционное вытеснение связей «компоненты битума – гидрофильные центры поверхности минеральных материалов». В водонасыщенном асфальтобетонном покрытии вследствие колебания температуры и попеременного водонасыщения – высушивания возникают напряжения, вызванные изменением объема

воды в порах, а также из-за различных коэффициентов термического расширения воды, битума и минеральных материалов. При достижении напряжениями критических значений ослабевают структурные связи в асфальтобетоне и происходит разрушение его под действием транспортных средств.

Испытания морозостойкости проводили на образцах ЩМА, содержащих 3, 5 и 7% сэвилена. Для сравнения использовали составы асфальтобетона с сэвиленом, содержащим 22 и 29% винилацетата. В качестве критерия морозостойкости использовали показатели снижения прочности при 20 и 50 °С образцов ЩМА на модифицированном битуме по сравнению с исходным.

Из рисунка 5 следует, что морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона при

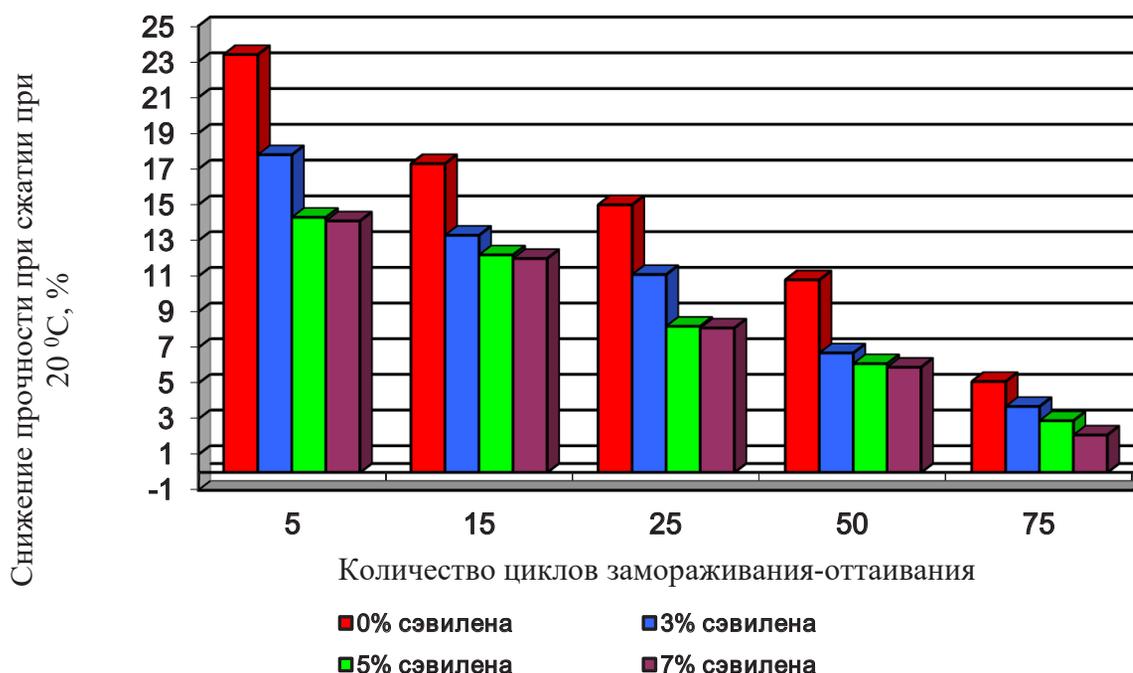


Рисунок 6 – Снижение прочности образцов с сэвиленом, содержащим 29 ВА, при 20 °С при замораживании – оттаивании

Figure 6 – Decreased strength of specimens with 29VA sevelen at 20°C during freeze-thaw

введении в вяжущее сэвилена значительно повышается. Так снижение прочности при сжатии при 20 °С через 5 циклов замораживания – оттаивания составила для ЩМА с 3, 5 и 7% добавки – 14,9, 12,0 и 11,8%, а через 50 циклов – 4,3, 4,0 и 3,7% соответственно (рисунок 5). Тогда как прочность образцов на битуме без добавки через 5 циклов испытаний снизилась на 18,5, а через 50 циклов – на 8,5%.

Для образцов с 29% винилацетата наблюдается аналогичная закономерность снижения прочности образцов при сжатии при 20 °С (рисунок 6). Морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона после 5 сут замораживания – оттаивания с 3% сэвилена снизилась на 17,8%, с 5 и 7% добавки на 14,3 и 14,1% соответственно. Через 75 циклов данный показатель уменьшился на 3,7, 2,9 и 2,1 % для 3, 5 и 7% сэвилена соответственно (см. рисунок 6).

Установлено, что испытание образцов при 50 °С оказало аналогичное влияние на морозостойкость, однако падение прочности при этой температуре испытания несколько выше,

чем при 20 °С. На немодифицированном битуме снижение прочности составило через 5 циклов – 23,4%, а через 75 циклов – 5,1%.

Снижение прочности образцов асфальтобетона с сэвиленом, содержащим 22 ВА, при 50 °С после 5 циклов замораживания – оттаивания составила 29,4, 24,8 и 23,4% при введении 3, 5 и 7% сэвилена. При добавлении сэвилена с 29% винилацетата данные значения возрастают до 37,5, 31,5 и 30,9% для 3, 5 и 7% добавки. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой устойчивости щебеночно-мастичного асфальтобетона с использованием сэвилена с 22% винилацетата, что вполне закономерно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применение сэвилена для модифицирования битума позволяет повысить водо- и морозостойкость асфальтобетона благодаря наличию полярных молекул в составе этиленвинилацетата, активно взаимодействующих с минеральными составляющими асфальтобетонной смеси.

Это будет способствовать хорошей сопротивляемости щебеночно-мастичного асфальтобетона агрессивным воздействиям воды и пониженной температуры в покрытии автомобильных дорог.

Наибольшей стойкостью к влажностному и температурному воздействию окружающей среды обладают полимерасфальтобетоны на основе вяжущего с сэвиленом, содержащим 22% винилацетата, что соответствует максимальной основности полимера.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет – 2030» на базе БГТУ им. В. Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синюгина Ю. В., Лакей В. Н., Медведев А. И., Артемов А. А. Моделирование климатических факторов и усталостного разрушения асфальтобетона // Матрица научного познания. 2021. №2–1. С. 70–73.
2. Ашуров Э. Т. Повышение коррозионной устойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Экономика и социум. 2021. № 10(89). С.513–517.
3. Золотарев В. А., Кудрявцева С. В., Агеева Е. Н. Водостойчивость битумополимерных вяжущих и асфальтополимербетонов на их основе // Вестник ХНАДУ. №34–35. 2006.
4. A. Onishchenko, L. Stolyarova, A. Bieliatynskyi. Evaluation of the durability of asphalt concrete on polymer modified bitumen//E3S Web of Conferences 157, 06005 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202016403027.
5. Hend Ali Omar, Nur Izzi Md. Yusoff, Muhammad Mubarak, Halil Ceylan. Effects of moisture damage on asphalt mixtures//Journal of traffic and transportation engineering (english edition) 2020 ; 7(5) : Pp. 600 -628. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.07.001.
6. A.A. Mamun, Md. Arifuzzaman. Nano-scale moisture damage evaluation of carbon nanotube-modified asphalt//Construction and Building Materials 193 (2018). Pp. 268–275. DOI: 10.1016/j.conbuildmat..2018.10.155Scopus.
7. Золотарев В. А., Кудрявцева С. В., Ефремов С. В. Влияние совместного введения полимеров и адгезионных добавок на свойства битумов // Вестник ХНАДУ. № 40. 2008.
8. Золотарев В. А. Битумы, модифицированные полимерами, и асфальтополимербетоны // Дорожная техника. 2009. С. 16–23.
9. Наволокина С. Н., Ядыкина В. В., Гридчин А. М. Щебеночно-мастичный асфальтобетон с использованием битума, модифицированного сэвиленом // Вестник им. В. Г. Шухова. 2021 Т. 6, № 8. С. 8–16.
10. Ядыкина В. В., Наволокина С. Н., Гридчин А. М. Повышение устойчивости щебеночно-мастичного асфальтобетона к колееобразованию за счет использования полимерных модификаторов // Строительные материалы и изделия.2020. № 6, Т. 3. С. 27–34.
11. Bhupendra Singh, Praveen Kumar. Effect of polymer modification on the ageing properties of asphalt binders: chemical and morphological investigation// Construction and Building Materials. 2019. № 205. Pp. 633-641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat..2019.02.050.
12. Yadykina V. V., Navolokina S. N., Gridchin A. M. The dependence of the modified bitumen properties on the amount of vinyl acetate in the sevilen composition // Materials Science Forum. ISSN: 1662-9752. 2019.Vol. pp 175-180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.175.
13. Ya Liu, Jing Zhang, Ru Chen, Jun Cai, Zhonghua Xi, hongfeng Xie. Ethylene vinyl acetate copolymer modified epoxy asphalt binders: phase separation evolution and mechanical properties// Construction and Building Materials. 2017. № 137. Pp. 55-65. DOI: 10/1088/1757-899X/578/1/012080 .
14. Бусел А. В. Добавки этилен-винил-ацетата для модифицирования дорожных битумов // Наука и техника в дорожной отрасли. 1999. № 2. С.12–14.
15. Yuliestyan A., Cuadri A.A., Garcia-Morales M., Partal P. Influence of polymer melting point and Melt Flow Index on the performance of ethylene-vinyl-acetate modified bitumen for reduced-temperature application // Materials and Design. 2016. № 96. Pp.180-188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.003.
16. Ming Liang, Shisong Ren, Weiyu Fan, Xue Xin, Jingtao Shi, Hui Luo. Rheological property and stability of polymer modified asphalt: effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers // Construction and Building Materials. 2017. № 137. Pp. 367-380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.123.
17. Gordon D. Airey. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens// Construction and Building Materials. 2002. № 16. Pp. 473-487. DOI: 10.1016/S0950-0618 (02) 00103-4.
18. Kezhen Yan, Jinghao Chen, Lingyun You, Shan Tian. Characteristics of compound asphalt modified by waste tire rubber (WTR) and ethylene vinyl acetate (EVA): Conventional, rheological, and microstructural properties//Journal of Cleaner Production 258 (2020) 120732. Pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2020.120732.
19. Хузаханов Р. М., Старостина И. А., Стоянов О. В., Русанова С. Н. Характер взаимодействия на границе раздела «сополимер этилена с винилацетатом-металл» // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 11. С. 191–194.

## REFERENCES

1. Sinyugina YU. V., Lakej V. N., Medvedev A. I., Artemov A. A. Modelirovanie klimaticheskikh faktorov i ustalostnogo razrusheniya asfal'tobetona // *Matrica nauchnogo poznaniya*. 2021. 2-1: 70-73.

2. Ashurov E. T. Povyshenie korrozionnoj ustojchivosti asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog // *Ekonomika i socium*. 2021. 10(89): 513-517.

3. Zolotarev V. A., Kudryavceva S. V., Ageeva E. N. Vodoustojchivost' bitumopolimernykh vyazhushchih i asfal'topolimerbetonov na ih osnove [Water resistance of bitumen-polymer binders and asphalt-polymer concretes based on them] // *Vestnik HNADU*. 2006, 34-34.

4. A. Onishchenko, L. Stolyarova, A. Bieliatynskiy. Evaluation of the durability of asphalt concrete on polymer modified bitumen//E3S Web of Conferences 157, 06005 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202016403027.

5. Hend Ali Omar, Nur Izzi Md. Yusoff, Muhammad Mubarak, Halil Ceylan. Effects of moisture damage on asphalt mixtures//*Journal of traffic and transportation engineering (english edition)* 2020 ; 7(5) : 600 -628. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.07.001.

6. A.A. Mamun, Md. Arifuzzaman. Nano-scale moisture damage evaluation of carbon nanotube-modified asphalt//*Construction and Building Materials* 193 (2018): 268–275. DOI: 10.1016/j.conbuildmat..2018.10.155.

7. Zolotarev V. A., Kudryavceva S. V., Efremov S. V. Vliyanie sovmeznogo vvedeniya polimerov i adgezionnykh dobavok na svojstva bitumov [The effect of the combined introduction of polymers and adhesive additives on the properties of bitumen] // *Vestnik HNADU*. 2008. №40.

8. Zolotarev V. A. Bitumy, modifitsirovannye polimerami, i asfal'topolimerbetony [Bitumen modified by polymers and asphalt polymer concretes] // *Dorozhnaya tekhnika*. 2009.: 16-23.

9. Navolokina S. N., Yadykina V. V., Gridchin A. M. Shchebenochno-mastichnyj asfal'tobeton s ispol'zovaniem bituma, modifitsirovannogo sevilenom // *Vestnik im. V. G. Shuhova*. 6(8): 8-16.

10. Yadykina V. V., Navolokina S. N., Gridchin A. M. Povyshenie ustojchivosti shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona k koleeobrazovaniyu za schet ispol'zovaniya polimernykh modifikatorov // *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2020, 6(3): 27-34.

11. Bhupendra Singh, Praveen Kumar. Effect of polymer modification on the ageing properties of asphalt binders: chemical and morphological investigation// *Construction and Building Materials*. 2019. 205: 633-641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat..2019.02.050.

12. Yadykina V. V., Navolokina S. N., Gridchin A. M. The dependence of the modified bitumen properties on the amount of vinyl acetate in the sevileno composition // *Materials Science Forum*. 2019.Vol. pp 175-180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.175.

13. Ya Liu, Jing Zhang, Ru Chen, Jun Cai, Zhonghua Xi, hongfeng Xie. Ethylene vinyl acetate

copolymer modified epoxy asphalt binders: phase separation evolution and mechanical properties// *Construction and Building Materials*. 2017. 137: 55-65. DOI: 10.1088/1757-899X/578/1/012080 .

14. Busel A. V. Dobavki etilen-vinil-acetata dlya modifitsirovaniya dorozhnykh bitumov // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli* [Ethylene-vinyl-acetate additives for modifying road bitumen]. 1999. 2:12-14.

15. Yuliestyan A., Cuadri A.A., Garcia-Morales M., Partal P. Influence of polymer melting point and Melt Flow Index on the performance of ethylene-vinyl-acetate modified bitumen for reduced-temperature application // *Materials and Design*. 2016. 96:180-188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.003.

16. Ming Liang, Shisong Ren, Weiyu Fan, Xue Xin, Jingtao Shi, Hui Luo. Rheological property and stability of polymer modified asphalt: effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers // *Construction and Building Materials*. 2017. 137: 367-380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.123.

17. Gordon D. Airey. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens// *Construction and Building Materials*. 2002. 16: 473-487. DOI: 10.1016/S0950-0618 (02) 00103-4.

18. Kezhen Yan, Jinghao Chen, Lingyun You, Shan Tian. Characteristics of compound asphalt modified by waste tire rubber (WTR) and ethylene vinyl acetate (EVA): Conventional, rheological, and microstructural properties//*Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120732. Pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2020.120732.

19. Huzahanov R. M., Starostina I. A., Stoyanov O. V., Rusanova S. N. Harakter vzaimodejstviya na granice razdela «sopolimer etilena s vinilacetatom-metal» [The nature of the interaction at the interface "ethylene vinyl acetate copolymer-metal"] // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013. 16(11): 191-194.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Ядыкина В.В. Постановка задач исследования. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Наволокина С.Н. Выбор методологии и методов исследования. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

Гриджин А.М. Формулирование проблемы исследования. Руководство процессом разработки темы.

## AUTHORS CONTRIBUTION

Valentina V. Yadykina. Statement of research problems. Generalization of the results of the work, formulation of conclusions. Editing an article.

Svetlana N. Navolokina. Choice of methodology and research methods. Implementation of experimental studies, processing of results. Article formatting.

Anatoly M. Gridchin. Formulation of the research problem. Leading the theme development process.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Ядыкина Валентина Васильевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автомобильных дорог и аэродромов.*

*Наволокина Светлана Николаевна – аспирант.*

*Гридчин Анатолий Митрофанович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автомобильных дорог и аэродромов.*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Valentina V. Yadykina – Dr. Sci., Professor, Professor of the Department Highways and Airfields Department, Shukhov Belgorod State Technological*

*Svetlana N. Navolokina - Postgraduate student.*

*Anatoly M. Gridchin - Dr. Sci., Professor, Professor of the Department Highways and Airfields Department.*

УДК 625.7/8

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ШТАМПОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ

А.С. Пролыгин, А.Л. Калинин, А.С. Александров\*, Н.П. Александрова  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

[aleksandrprolygin@mail.ru](mailto:aleksandrprolygin@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

[1exsandr55ne@mail.ru](mailto:1exsandr55ne@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>,

[aleksandrov00@mail.ru](mailto:aleksandrov00@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

[nata26.74@mail.ru](mailto:nata26.74@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Целью статьи является сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов, регламентируемых различными стандартами РФ.

**Материалы и методы.** Экспериментальное определение модулей деформации грунта земляного полотна выполнено при помощи штамповых испытаний, которые произведены в грунтовом лотке путем нагрузки и разгрузки грунтового основания, уплотненного до требуемого коэффициента уплотнения 0,98. Нагрузка прикладывалась ступенями, а осадка штампа измерялась по завершению стабилизации деформации от каждой ступени. Критерием стабилизации деформации являлось снижение скорости деформации до 0,02 мм/мин и время приложения нагрузки, которое должно составлять не менее 120 с. После измерения упругопластических осадок грунта выполнена разгрузка модели. Разгрузка тоже произведена ступенями. В результате построены зависимости упругопластической и упругой осадки грунтовой модели земляного полотна от давления в виде петель гистерезиса.

**Результаты.** Расчеты значений модуля деформации грунта выполнены по различным методикам, регламентируемым стандартами Российской Федерации. Результаты расчета сгруппированы в выборки данных, которые обработаны методами математической статистики. При обработке данных каждая выборка проверена на наличие грубых ошибок. Выборки данных проверены на принадлежность одной генеральной совокупности. Для проверки принадлежности трех выборок к одной генеральной совокупности применен критерий Kruskal W.H. и Wallis W.A. На основании этого сравнения получены данные о значимости различий в выборках.

**Обсуждение и заключение.** Для определения модуля деформации грунта земляного полотна рекомендован способ вычисления модуля деформации по методике, предполагающей нелинейную зависимость деформаций от давлений, описываемую полиномом второй степени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** земляное полотно, грунт, модуль деформации

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 14.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пролыгин А. С. Сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов / А. С. Пролыгин, А. Л. Калинин, А.С. Александров, Н.П. Александрова // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 114-130. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

© Пролыгин А.С., Калинин А.Л., Александров А.С., Александрова Н.П., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>

Original article

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING STAMP MODULES OF SOIL DEFORMATION

**Aleksandr L. Kalinin, Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov\*, Natalia P. Aleksandrova**

*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),*

*Omsk, Russia*

*aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,*

*1exsandr55ne@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>,*

*aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,*

*nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>*

*\*corresponding author*

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of the article is a comparative analysis of methods for calculating stamp modules of soil deformation regulated by various standards of the Russian Federation.

**Materials and methods.** The experimental determination of the deformation modules for the soil of the roadbed was performed using stamp tests. The tests were carried out in a soil tray by loading and unloading a soil base compacted to the required compaction coefficient of 0.98. The load was applied by steps, and the stamp draft was measured after completion of deformation stabilization from each step. The criterion for stabilizing the deformation was a decrease in the speed to 0.02 mm / min and the time of application of the load, which should be at least 120 s. After measuring the elasto-plastic draft of the soil, the model was unloaded. Unloading is also carried out by steps. As a result, the dependences of the elasto-plastic and elastic draft of the soil model of the roadbed from the pressure in the form of hysteresis loops are constructed.

**Results.** The calculations of the soil deformation modulus were performed according to the various methods regulated by the standards of the Russian Federation. The calculation results are grouped into data samples that are processed by mathematical statistics methods. When processing data, each sample is checked for the presence of gross errors. The data samples are checked for belonging to one general population. To check whether three samples belong to one general population, the Kruskal W. H. and Wallis W. A. criterion was applied. Based on this comparison, we made judgments about the significance of differences in the samples.

**Discussion and conclusions.** To determine the deformation modulus of soil and road pavements made of granular materials, a method for calculating the modulus of deformation using a method that assumes a nonlinear dependence of deformations on pressures, described by a second-degree polynomial is recommended.

**KEYWORDS:** roadbed, soil, deformation modulus

**The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.**

**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: Kalinin A.L., Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P. Comparative analysis of methods for calculating stamp modules of soil deformation. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (1): 114-130. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130>*

© Kalinin A.L., Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стандарты Российской Федерации ГОСТ 33382–2015<sup>1</sup>, ГОСТ Р 58818–2020<sup>2</sup>, ПНСТ 371–2019<sup>3</sup> разделяют автомобильные дороги общего пользования на две группы: дороги общего пользования и дороги с низкой интенсивностью движения. Такое разделение востребовано в практике дорожного строительства Омской области, в которой протяженность грунтовых дорог составляет 10022,3 км. Безусловно, что строительство дорожных одежд на такой большой протяженности грунтовых дорог требует экономичного использования материалов. Это достигается исследованием возможности и эффективности применения в дорожных конструкциях отходов промышленности и местных материалов. Специалистами ФГБОУ ВО «СибАДИ» выполнен большой объем экспериментальных работ по изучению свойств зол уноса и золошлаковых смесей [1, 2, 3], белитового шлама [4, 5, 6], грунтощебеночных смесей [7, 8] и геосинтетических материалов для армирования конструктивных слоев дорожных одежд [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Для проектирования дорожных одежд дорог с низкой интенсивностью движения применяются две разные методики. Проектирование нежестких дорожных одежд капитального и облегченного типа с усовершенствованным покрытием выполняют по традиционной методике, в соответствии с которой расчет на прочность выполняется с применением трех критериев. Такими критериями является расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу и проверки по сопротивлению усталостному разрушению от изгиба монолитных слоев и сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна. Нежесткие дорожные одежды переходного и низшего типов проектируют по критериям прочности и эксплуатационной надежности. Расчет на прочность выполняют по упругопластической деформации, обеспечивая на поверхности покрытия требуемое значение общего модуля деформации. Расчет по эксплуатационной надежности выполняют определением глубины колеи и сравнивают ее величину с допустимым значением. Необходи-

мость отличий в расчетах слоев из монолитных и зернистых материалов упругого прогиба обсуждалась в работе [15], где отмечено, что традиционная методика вычисления общего модуля упругости основана на решении теории изгиба пластин. Поэтому в рамках нормативного расчета способностью работать на изгиб наделены как слои из монолитных материалов, так слои из зернистых материалов и песков. В действительности зернистые материалы и грунты работают в условиях трехосного сжатия, что требует вычисления перемещения их поверхности путем интегрирования вертикальной деформации по толщине слоя или глубине грунтового полупространства [15, 16, 17, 18].

Безусловно, что, решая задачи совершенствования методов расчета, изгибаемых асфальтобетонных слоев и слоев из зернистых материалов, а также грунтов земляного полотна, используются знания разных разделов механики. Расчеты дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием и слоями из монолитных материалов развивают:

- созданием методов расчета изменения ровности под влиянием морозного пучения грунтов [19];
- совершенствованием усталостных теорий, применяя модели нелинейного накопления повреждений в цементобетонах [21] и асфальтобетонах [21, 22, 23];
- разработкой и совершенствованием механико-эмпирических методов по расчету глубин колеи [24, 25, 26].

Проблемой слоев дорожной одежды из зернистых материалов является образование колеи, которые образуются из-за накопления остаточных деформаций в этих слоях и грунтах земляного полотна. Поэтому совершенствование расчетов дорожных одежд со слоями из таких материалов выполняют разработкой способов расчета остаточных деформаций [27, 28, 29, 30] или совершенствованием методов расчета по сопротивлению сдвигу [31] с уточнением параметров критерия Мора–Кулона и разработкой математических моделей, связывающих сцепление и угол внутреннего трения с влажностью [32].

<sup>1</sup>. ГОСТ 33382–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. Введен в действие 08.09.2016. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>2</sup>. ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 15.04.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020.

<sup>3</sup>. ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

Проблема образования колеи актуальна для дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения. Такие дороги имеют дорожные одежды, как правило, переходного или низшего типа. Покрытия таких дорог часто выполняют из зернистых материалов. Для уменьшения интенсивности накапливания остаточных деформаций в щебеночных слоях их армируют геосинтетическими материалами [9, 10, 11, 12, 13, 14, 33, 34, 35]. Кроме того, материалы и грунты стабилизируют или укрепляют вяжущими материалами [36, 37, 38, 39], в том числе с использованием технологий холодной регенерации покрытий [40, 41, 42, 43, 44].

Безусловно, что использование отходов промышленности и применение местных материалов в конструктивных слоях дорожной одежды и земляном полотне требует опреде-

ления их параметров прочности и деформируемости. Штамповые модули деформации и упругости грунтов и материалов являются одним из важнейших параметров, применяемых при расчете дорожных одежд по прочности. Модуль деформации необходим при вычислении общего модуля деформации на поверхности дорожной одежды переходного и низшего типа для дорог с низкой интенсивностью движения. Модуль упругости слоев используют в традиционном расчете дорожных конструкций по критерию упругого прогиба.

В настоящее время для испытаний дорожных одежд применяют статические и динамические методы испытаний жестким круглым штампом и колесом автомобиля. На рисунке 1 приведено оборудование для динамических испытаний жестким круглым штампом.



Рисунок 1 – Установки динамического нагружения для штамповых испытаний:  
а – ДИНА 3М; б – ДИНА 4; в – FWD Primax 1500 испытание тяжелой нагрузкой;  
г – УДН для испытание легкой нагрузкой.  
Составлено автором

Figure 1 – Dynamic loading units for stamp tests:  
a – DIN 3M; b – DIN 4; v – FWD Primax 1500 heavy load test; g – UDN for light load test.  
Compiled by the author

На рисунке 2 приведены результаты статических испытаний дорожных одежд колесом автомобиля и жёстким круглым штампом.

На рисунках 1 и 2 приведено оборудование, наиболее часто применяемое в России для определения параметров деформируемости грунтов и дорожных одежд. Основным отличием в методиках эксперимента является характер приложения нагрузки и контактные давления штампа с испытываемой поверхностью земляного полотна или дорожной одежды. При динамических испытаниях нагрузка прикладывается в виде удара путем сброса груза определенной массы с заданной высоты. Варьированием высоты сброса груза заданной массы имитируется величина статической нагрузки. Например, масса падающего груза установки ДИНА 3 М составляет  $160 \pm 2$  кг, а высота сброса груза рассчитана из условия воздействия нагрузки  $50 \pm 2,5$  кН. Таким образом, в установке ДИНА 3 М масса падающего

груза составляет около 160 кг, но за счет высоты сброса эта масса создает динамическое усилие, эквивалентное статической нагрузке 50 кН. Установка Дина 4 более совершенна, она способна варьировать высоту сброса груза, что позволяет выполнять испытания в диапазоне усилий 30...65 кН. Тем не менее динамические установки, показанные на рисунке 1, снабжены жестким круглым штампом, у которого форма эпюры контактных давлений имеет седлообразную форму с минимальной величиной давления в центре штампа и максимальной по краям. Следовательно, распределение давлений под жестким штампом коренным образом отличается от распределения давлений между слоями дорожных одежд и контактных давлений между поверхностями гибкого штампа и испытываемой поверхностью дорожной одежды. При испытаниях колесом автомобиля эпюра распределения контактных давлений полностью соответствует реально-



Рисунок 2 – Испытания дорожных одежд статической нагрузкой:  
 а и б – испытание колесом автомобиля стадии нагрузки и разгрузки соответственно;  
 в – общий вид штамповой установки при статических испытаниях;  
 г – детализированный вид установки прогибомера в тоннель штампа, динамометра и домкрата

Figure 2 – Tests of road pavement with static load:  
 a and b - testing with a car wheel of the loading and unloading stages, respectively;  
 c - a general view of the stamp installation during static tests;  
 d – a detailed view of the installation of the deflection meter in the tunnel of the stamp, dynamometer and jack



Рисунок 3 – Установка динамического нагружения нагрузка колесная

Figure 3 – Installation of dynamic loading wheel load

му воздействию, поэтому специалисты дорожной отрасли наиболее часто применяют метод испытания колесом автомобиля, используя в качестве измерительного оборудования балку Бенкельмана или ее российский аналог прогибомер. Отметим, что для динамических испытаний коллектив МАДИ разработал установку динамического нагружения с колесной нагрузкой УДН НК, она приведена на рисунке 3.

Установка динамического нагружения с колесной нагрузкой была выпущена сравнительно малой партией, вследствие чего испытания дорожных одежд выполняются преимущественно либо УДН ДИНА 3 М, либо УДН ДИНА 4. Тем не менее характер распределения контактных давлений является одним из ключевых вопросов при определении параметров прочности и деформируемости, а также характеристик напряженно деформированного состояния грунтов земляного полотна. Вычисление модуля деформации и модуля упругости грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды из зернистых материалов выполняется по классическим формулам, связывающих осадку линейно деформируемого или упругого полупространства со средним давлением от жесткого или гибкого штампа. В этом случае формулы для расчета осадок содержат коэффициент, учитывающий форму и жесткость штампа, а также местоположение точки под штампом (центр штампа, край прямоугольного штампа), относительно которой проводятся вычисления.

Обобщающая зависимость осадки от давления, воспринимаемого основанием от штампа, приводится в учебной литературе, например в учебнике Н. А. Цытовича<sup>4</sup>. Эта зависимость имеет вид:

$$S_z = w \cdot p \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sqrt{F} \cdot E^{-1}, \quad (1)$$

где  $w$  – интегральный коэффициент, постоянный для данной формы площади подошвы и местоположения рассматриваемой точки;  $p$  – среднее давление, определяемое отношением нагрузки на штамп к его площади, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $F$  – площадь штампа, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль деформации при расчете общей упругопластической осадки или модуль упругости при расчете упругой осадки, Па.

В общепринятом виде выражение (1) записывают формулами:

$$S_z = \frac{w_{шт} \cdot p \cdot b \cdot (1 - \mu^2)}{E};$$

$$S_z = \frac{w_{шт} \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E}, \quad (2)$$

где  $w_{шт}$  – коэффициент формы площади подошвы и жесткости фундамента, одинаковый для всей площади или различный для ее разных точек, принимаемый по данным Ф. Шлейхера, Н. А. Цытовича и М. И. Горбунова-Посадова;  $b$  – ширина прямоугольного штампа, м;  $D$  – диаметр штампа, м.

<sup>4</sup>Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

Таблица 1  
Значения коэффициента  $w_{шт}$  по данным Н. А. Цытовича

Table 1  
Values of the  $w_{шт}$  coefficient according to N.A. Tsytovich

Форма штампа	$w_{шт}$ для полупространства				$w_{шт}$ для слоя ограниченной толщины при $h/b$ или $h/D$				
	$w_y$	$w$	$w_{cp}$	$w_{ж}$	0,25	0,5	1	2	5
Круглый	0,64	1,0	0,85	0,79	0,22	0,38	0,58	0,70	0,78
Квадратный	0,5 $w$	1,12	0,95	0,88	0,22	0,39	0,62	0,77	0,87
Прямоугольный при $h/b=2$	0,5 $w$	1,53	1,30	1,22	0,24	0,43	0,70	0,96	1,16
Прямоугольный при $h/b=3$	0,5 $w$	1,78	1,53	1,44	0,24	0,44	0,73	1,04	1,31
Прямоугольный при $h/b=4$	0,5 $w$	1,96	1,70	1,61	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=5$	0,5 $w$	2,10	1,83	1,72	нет	нет	нет	нет	нет
Прямоугольный при $h/b=10$	0,5 $w$	2,53	2,25	2,12	0,25	0,46	0,77	1,15	1,62

Значения коэффициентов формы площади подошвы и жесткости фундамента приведены в таблице 1.

Примечание:  $w_y$ ,  $w$  и  $w_{cp}$  – коэффициенты для осадок гибкого штампа в угловых точках ( $w_y$ ), максимальной под центром фундамента или штампа ( $w$ ) и средний по всей загруженной площади ( $w_{cp}$ );  $w_{ж}$  – коэффициенты для абсолютно жесткого фундамента (штампа); для слоя ограниченной толщины коэффициенты даны для средней осадки по всей загруженной площади при толщине слоя меньшей удвоенной эквивалентной толщины, определяемой по Н. А. Цытовичу.

Отметим, что представленное в таблице 1 значение коэффициента  $w_{ж}=0,79$  является приближенной величиной, а точное значение этого коэффициента определяется отношением числа  $\pi$  к 4. Сделав это замечание, запишем формулы для расчета осадок жесткого и гибкого круглых штампов. Эти формулы имеют вид:

$$S_{ж} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E}; \tag{3}$$

$$S_{г} = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E},$$

где  $p_{ж}$  и  $p_{г}$  – средние давления от жесткого и гибкого штампа, определяемые отношением нагрузки к площади штампа.

Формулы (3) постулируют, что при равенстве средних давлений  $p_{ж}=p_{г}$  осадка жесткого штампа меньше осадки гибкого штампа. Зависимости (3) определяют применимость методов испытаний жестким и гибким штампом к расчету параметров грунтов в стадии их линейного деформирования. Например,

вычисление модуля деформации или упругости по зависимостям (3) производится путем решения этих уравнений относительно модуля деформации или упругости  $E$ . В этом случае получим известные формулы:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_{ж}}; \tag{4}$$

$$E = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_{г}}.$$

Формулы (4) постулируют независимость модуля деформации или упругости грунта от штампа, свойства которого учитываются коэффициентом  $w_{шт}$ . Тем не менее эти формулы можно использовать только в диапазоне давлений, максимальная величина которых ограничена первой критической нагрузкой Н. М. Герсеванова. Соотношение между средними давлениями от жесткого и гибкого штампов для деформирования основания на одну и ту же величину можно получить из совместного решения (3). Приравняв эти зависимости и выполнив преобразования, получим

$$\frac{\pi}{4} \cdot \frac{p_{ж} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E} = \frac{p_{г} \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E}; \tag{5}$$

$$\frac{p_{г}}{p_{ж}} = \frac{\pi}{4}; \quad p_{г} = \frac{\pi}{4} \cdot p_{ж}; \quad p_{ж} = \frac{4}{\pi} \cdot p_{г}.$$

Формулы (5) постулируют соотношение между средними давлениями от гибкого и жесткого штампа для деформирования испытываемого основания на одну и ту же величину. Из этих зависимостей следует, что для деформирования осадки на одну и ту же вели-

чину среднее давление от гибкого штампа составляет примерно 79% от среднего давления от жесткого штампа. Формулы (5) применимы для пересчета первой критической нагрузки, определенной по результатам испытаний жестким круглым штампом, в первую критическую нагрузку от гибкого штампа. Из этих же формул следует, что первая критическая нагрузка от гибкого круглого штампа всегда меньше первой критической нагрузки от жесткого круглого штампа. Этот простой вывод обуславливает то, что напряжения, измеряемые в точках, расположенных на разной глубине оси симметрии по нагрузке гибкого круглого штампа всегда больше напряжений, расположенных в аналогичных точках на оси симметрии жесткого штампа того же диаметра.

Таким образом, формулы (4) постулируют правомерность применения моделей линейно-деформируемой среды и упругого полупространства к определению модуля деформации или упругости основания, но в тех случаях, когда осадка с давлением связана линейной зависимостью, то есть при давлениях, величина которых не превышает первую критическую нагрузку, правила определения которой даны в ГОСТ 20276.1–2020<sup>5</sup>. Формулы (5) постулируют необходимость выполнения экспериментального исследования напряжений и деформаций в точках по глубине дорожной конструкции гибким штампом или колесом автомобиля, выполняемых за рубежом на специальных кольцевых стендах [45, 46]. Это подтверждается анализом НДС в точках, под гибким и жестким штампом [47]. Тем не менее зависимости (5) могут оказаться полезными для специалистов дорожной отрасли, выполняющих исследования первой критической нагрузки жестким круглым штампом.

Методы штамповых испытаний, регламентируемые ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018, для определения модуля деформации грунтов и материалов ориентированы на использование всей нелинейной зависимости осадки от давления. В этих документах применяются различные исходные зависимости осадки от давления, что определяет отличие формул для вычисления модулей деформаций. Отсюда вытекает актуальность работ, направленных на выбор наиболее рационального метода вычисления модуля деформации грунтов и материалов.

На основе такой острой необходимости целью нашей работы является статистический анализ модулей деформации, вычисленных по различным методам, оперирующим нелинейными экспериментальными зависимостями осадок от давления. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

Произвести штамповые испытания грунта земляного полотна в широком диапазоне давлений, получив экспериментальные нелинейные зависимости осадок от давлений.

Произвести вычисление нелинейного модуля деформации с использованием различных приемов его осреднения по величине давления или методов, регламентируемых ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018.

Дать рекомендации по применению наиболее пригодной формулы для вычисления модуля деформации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач были выполнены штамповые испытания грунта земляного полотна, отсыпанного в лотке грунтовой лаборатории. При выполнении испытаний использовали стандартную штамповую установку с гидравлическим домкратом, электронным динамометром и жестким круглым штампом диаметром 33 см. В ходе выполнения эксперимента выполнено испытание пяти точек грунта земляного полотна. Толщина модели отсыпанного земляного полотна составляет 1,2 м, что сопоставимо с четырьмя диаметрами штампа. Во избежание влияния на значения осадок грунтового массива бетонного дна лотка максимальная величина давления от штампа ограничена значением до 0,25 МПа. Такое ограничение допустимо предварительным национальным стандартом Российской Федерации ПНСТ 311–2018. Требования этого стандарта приняты за основу выполнения экспериментов, в соответствии с требованиями назначали величину ступеней при нагрузке и последующей разгрузке модели земляного полотна. Испытания выполнены при помощи штамповой установки, в состав которой входят упорная балка, нагрузочная плита (штамп), гидравлический домкрат, прогибомер, снабженный индикатором, а также приведена иллюстрация приложения нагрузки с контролем ее величины по электронному динамометру. Иллюстрации устройства модели земляного полотна и основных моментов штамповых

<sup>5</sup> ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. Введен в действие 11.08.2020. Взамен ГОСТ 20276–2012 в части метода испытания штампом. М.: Стандартинформ, 2020.

Таблица 2  
 Формулы для расчета осадок и модулей деформации грунтов, регламентируемые государственными и предварительными национальными стандартами России

Table 2  
 Formulas for calculating settlements and deformation modulus of soils, regulated by state and preliminary national standards of Russia

Стандарт	Характеристика	Формулы для расчета
ГОСТ 20276.1–2020	Модуль деформации $E_d$	$E_d = (1 - \mu^2) \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S_z}$
ПНСТ 371–2019	Относительная садка грунта земляного полотна	$\lambda = \frac{S_z}{D}$
	Модуль деформации грунта земляного полотна $E_d$	$E_d = \frac{p}{\lambda}$
ПНСТ 311–2018	Осадка грунта земляного полотна	$S_z = a_0 + a_1 \cdot p_0 + a_1 \cdot p_0^2$
	Модуль деформации $E_d$	$E_d = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot p_{max}}$
	Модуль упругости $E_r$	$E_r = \frac{0,75 \cdot D \cdot p_{max1}}{S_{el}}$

где  $K_1$  – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;  $\Delta p$  и  $\Delta S_z$  – соответственно приращения давления и осадки; где  $\lambda$  – требуемая величина относительной деформации, значение которой принимается в диапазоне  $\lambda=0,01 \dots 0,02$  для грунтов земляного полотна и  $\lambda=0,04 \dots 0,08$  для дорожных одежд;  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  – постоянные многочлена второй степени;  $p_{max}$  – максимальная величина давления, переданного штампом на земляное полотно или дорожную одежду, при измерении, МПа;  $p_{max1}$  – максимальная величина давления достигнутая на стадии нагрузки, МПа

испытаний приведены нами в работе [8]. При расчете модуля деформации применяли формулы, представленные в таблице 2.

Нагрузка от каждой ступени выдерживалась в течение времени, необходимого для стабилизации осадки. Это время определялось по уменьшению скорости деформации грунтового земляного полотна до величины 0,02 мм/мин, но не менее чем 2 мин. По завершению стабилизации деформации прикладывали следующую ступень нагрузки, ожидая стабилизации осадки. Нагрузку прикладывали до тех пор, пока давление от штампа не достигнет значения 0,25 МПа. После чего выполняли разгрузку.

Результаты испытаний в каждой из пяти точек представляли в виде графической зависимости упругопластической и обратимой деформации от давления. Кривые упругопластической и обратимой осадок образуют петли гистерезиса, площадь которых равна потерянной энергии, перешедшей в тепло. Такие зависимости приведены на рисунке 4.

Вычисление модуля деформации выполнялось по каждой из трех формул, представленных в таблице 1. В результате расчета формировались три выборки частных значе-

ний штамповых модулей деформации грунта. Первая выборка содержит модули деформации, вычисленные по формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, но с одним отличием. По формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, нами определен нелинейный модуль деформации. Для этого вычисления выполнены для всех ступеней нагрузки. Методика вычисления штампового модуля деформации, регламентируемая ГОСТ 20276.1–2020, ориентирована на вычисление линейного модуля деформации. Для этого ГОСТ 20276.1–2020 определяет правила определения координат точек, ограничивающих начальный линейный участок криволинейной зависимости осадки от давления, после чего в расчет модуля деформации берутся точки (ступени), принадлежащие этому прямолинейному отрезку. Методики расчета модуля деформации, регламентируемой ПНСТ 311–2018, используют все точки криволинейной зависимости осадки от давления. Поэтому вычисление модулей деформации по формуле, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, выполнено с учетом всех точек. Пояснение расчетов модуля деформации грунта по формулам таблицы 1 приведены в виде графических иллюстраций на рисунке 5.

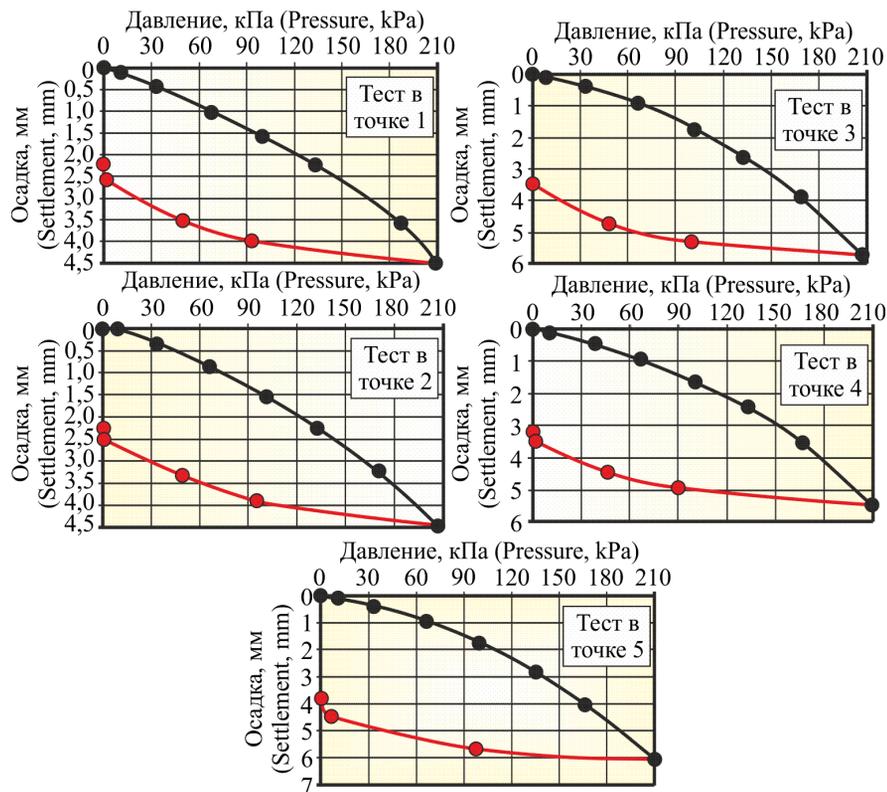


Рисунок 4 – Зависимость осадки от давления в виде петель гистерезиса

Figure 4 – Dependence of precipitation on pressure in the form of hysteresis loops

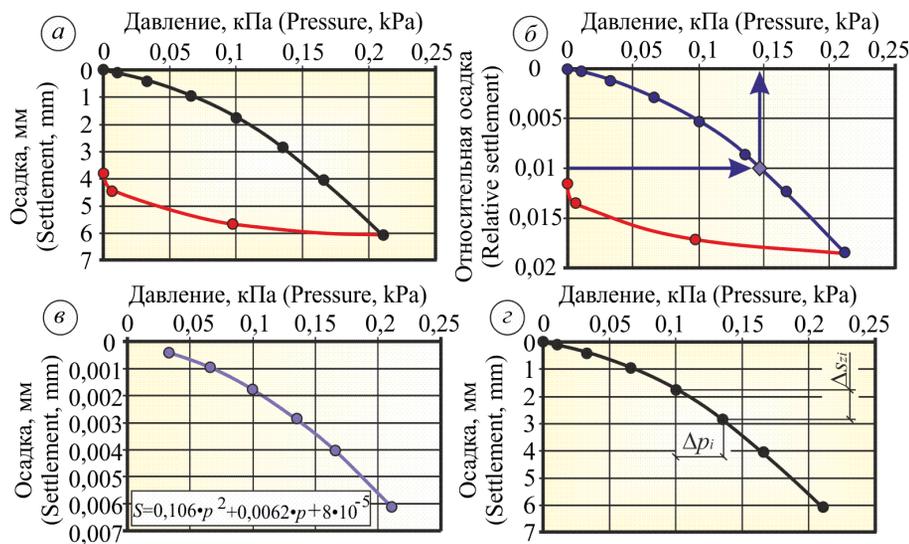


Рисунок 5 – Иллюстрации к вычислению модуля деформации:  
 а – зависимость осадки от давления в точке испытаний 5; б – зависимость относительной осадки от давления и определение давления соответствующего величине относительной осадки 0,01;  
 в – аппроксимация зависимости осадки от давления многочленом второй степени;  
 г – иллюстрация определения приращения осадки и давления от *i*-й ступени нагрузки

Figure 5 – Illustrations for calculating the deformation modulus:  
 а – dependence of settlement from pressure at test point 5; б – dependence of the relative settlement from pressure and determination of the pressure corresponding to the value of the relative settlement 0,01;  
 в – approximation of the dependence of settlement from pressure by a polynomial of the second degree;  
 г – illustration of determining the increment of settlement and pressure from the *i*-th stage of loading

На рисунке 5, а приведена экспериментальная зависимость осадок от давления, она построена по результатам испытаний в точке 5. На рисунке 5, б, в, г, приведены схематические пояснения к вычислению штамповых модулей деформации по методикам ПНСТ 371–2019, ПНСТ 311–2018 и ГОСТ 20276.1–2020. Для вычисления модуля деформации по методике ПНСТ 371–2019 необходимо вычислить относительные осадки  $\lambda$ , определяемые отношением осадки  $S_z$  к диаметру штампа  $D$ . Вычисленные значения относительных осадок используют для построения графика, иллюстрирующего зависимость таких относительных осадок от давления. Этот график показан на рисунке 5, б. При помощи такого графика определяют давление, соответствующее требуемой величине относительной осадки, которую принимают в диапазоне  $\lambda=0,01\dots0,02$ . На рисунке 5, б принято, что требуемая величина относительной осадки составляет  $\lambda=0,01$ . Тогда давление, соответствующее величине  $\lambda=0,01$ , достаточно просто определить по графику, оно приблизительно составляет  $p\approx0,15$  МПа. Далее по формуле таблицы 2, регламентируемой ПНСТ 371–2019, вычисляется величина модуля деформации. Анализируя этот способ, отметим, что при нелинейной зависимости относительной осадки от давления с увеличением требуемого значения относительной осадки  $\lambda$  от 0,01 до 0,02 вычисляемая величина модуля деформации будет уменьшаться.

При расчете модуля деформации по методике ПНСТ 311–2018 зависимость осадок от давления необходимо аппроксимировать многочленом второй степени, как показано на рисунке 5, в. При этом первые две точки графика при аппроксимации не учитываются. Из этих двух точек, первая точка является началом координат, а вторая связывает наименьшую осадку с минимальным давлением, применяемым для пригрузки земляного полотна в начале испытаний. В результате аппроксимации вычисляют значения коэффициентов полинома второй степени. Согласно данным рисунка 5, в значения этих коэффициентов составляют:  $a_0=8\cdot10^{-5}$ ,  $a_1=0,0062$  и  $a_2=0,106$ . Значения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  используют для вычисления модуля деформации, а расчет выполняют по формуле таблицы 2, регламентируемой ПНСТ 311–2018. На рисунке 5, г представлена иллюстрация определения модуля деформации по методике ГОСТ 20276.1–2020. Согласно этой методике предварительно необходимо определить приращения давлений от

ступеней нагрузки  $\Delta p_i$  и соответствующие им приращения осадок  $\Delta S_{zi}$ . Далее для соответствующих приращений давлений  $\Delta p_i$  и осадок  $\Delta S_{zi}$  по формуле таблицы 2, регламентируемой ГОСТ 20276.1–2020, вычисляются модули деформации  $E_{di}$ . Для этой методики характерно уменьшение величины модуля деформаций при использовании в расчете приращений давлений  $\Delta p_i$  и осадок  $\Delta S_{zi}$ , соответствующих возрастанию осадок.

Учитывая специфику расчетов модуля деформации по методикам ГОСТ 20276.1–2020 и ПНСТ 371–2019, состоящую в зависимости величины модуля деформации от осадки, нами вычислены средние значения этих деформационных характеристик. При использовании методики ПНСТ 371–2019 вначале вычисляли максимальное значение модуля деформации  $E_{dmax}$ , которое соответствует относительной осадке  $\lambda=0,01$ . Затем рассчитывали минимальное значение модуля деформации  $E_{dmin}$ , оно получается либо при относительной осадке  $\lambda=0,02$ , либо при максимальной величине относительной осадки  $\lambda_{max}$ , измеренной при испытании, меньшей значения 0,02, но большей величины 0,01, то есть  $0,01 < \lambda_{max} \leq 0,02$ . Расчет среднего значения модуля деформации по методике ПНСТ 371–2019 выполняли по формуле

$$E_d = \frac{E_{dmin} + E_{dmax}}{2}. \quad (6)$$

При расчете модуля деформации по методике ГОСТ 20276.1–2020 производили вычисление модулей деформаций для каждой ступени нагрузки  $E_{di}$ , используя соответствующие этой ступени приращения осадки и давления. На завершающем этапе производили расчет усредненной по осадке величины модуля деформации. В этом случае применяли формулу

$$E_d = \frac{\sum_{j=1}^n E_{di} \cdot \Delta S_j}{\sum_{j=1}^n \Delta S_j}. \quad (7)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний представляли в виде выборок модулей деформации. Общее число выборок равно количеству методов расчета модуля деформации, то есть 3 выборки. Каждая выборка состояла из пяти частных значений модуля деформации, полученных расчетом при использовании экспериментальных данных в соответствующих точках измерений. Каждая выборка данных проверена на нали-

Таблица 3  
Результаты статистической обработки

Table 3  
Results of statistical processing

Статистическая характеристика		Величина характеристики при применении методики расчета модуля деформации		
		ГОСТ 20276.1–2020	ПНСТ 371–2019	ПНСТ 311–2018
Частное значение модуля деформации по точкам испытаний $E_{di}$ , МПа	1	9,9	16,5	12,1
	2	9,7	16,3	11,7
	3	7,4	14,2	9,2
	4	7,8	14,6	10,2
	5	7,1	13,2	8,7
Среднее значение $E_d$ , МПа		8,4	15,0	10,4
Среднеквадратическое отклонение $S$ , МПа		1,3	1,4	1,5
Наибольшее значение $ E_d - E_{di} $ , МПа		1,5	1,8	1,7
Значение статистического критерия $v$ при числе определений $n=5$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		1,92	1,92	1,92
Значение критерия $v \cdot S$		2,5	2,7	2,9
Выполнение критерия $ E_d - E_{di}  > v \cdot S$		нет	нет	нет
Вывод о наличии грубых ошибок в выборке		ошибок нет	ошибок нет	ошибок нет
Коэффициент вариации $V$ , %		15,7	9,4	14,4
Выполнение критерия $V < V_{lim}$ , $V_{lim} = 30\%$		да	да	да
Вывод о применимости нормального закона распределения случайной величины		да	да	да
Коэффициент $t_{\alpha}$ при числе степеней свободы $K=4$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		2,78	2,78	2,78
Расчетное значение	минимальное	6,7	13,2	8,5
	максимальное	10,0	16,7	12,2

чие грубых ошибок с использованием стандартного критерия отсева. Кроме того, сравнением коэффициента вариации с его предельной величиной выполнена грубая оценка применимости нормального закона распределения случайной величины. На завершающем этапе определены расчетные значения модулей деформации, вычисляемых по разным методикам. Результаты статистической обработки приведены в таблице 3.

Из анализа данных таблицы 3 следует, что средние и расчетные значения модулей деформации, вычисленные по формулам разных стандартов, существенно отличаются, поэтому при определении деформационных характеристик необходимо обосновать методику вычисления модуля деформаций по измеренным осадкам и давлениям.

Для такого обоснования выполним проверку трех выборок на принадлежность одной генеральной совокупности. Так как количество частных значений модуля деформации во всех

выборках одинаково, то в наших целях можно использовать ранговый критерий W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48]. Критерий W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48] представляет собой непараметрическую альтернативу критерию Фишера. Этот критерий основан на оценке разностей между с медианами ( $c > 2$ ) и является обобщением рангового критерия Уилкоксона [49].

При применении критерия [48] необходимо заменить наблюдения в выборках их объединенными рангами. При этом первый ранг соответствует наименьшему наблюдению, а последний ранг соответствует наибольшему наблюдению. Если некоторые значения повторяются, им присваивается среднее значение их рангов.

Применение критерия W.H. Kruskal, W.A. Wallis [48] основано на вычислении статистики  $H$ . Расчет производят по формуле

$$E_d = \frac{\sum_{j=1}^n E_{di} \cdot \Delta S_j}{\sum_{j=1}^n \Delta S_j} \quad (8)$$

Таблица 4  
Частные значения модуля деформации и соответствующие им ранги

Table 4  
Particular values of deformation modulus and their corresponding ranks

Выборка 1 (GOST 20276-2012)		Выборка 2 (PNST 311-2018)		Выборка 3 (PNST 371-2019)	
$E_{дi}$ , МПа	Ранг	$E_{дi}$ , МПа	Ранг	$E_{дi}$ , МПа	Ранг
7,1	1	8,7	4	13,2	11
7,4	2	9,2	5	14,2	12
7,8	3	10,2	8	14,6	13
9,7	6	11,7	9	16,3	14
9,9	7	12,1	10	16,5	15
$T_1$	19	$T_2$	36	$T_3$	65

где  $n$  – общее количество наблюдений в выборках,  $n_j$  – количество наблюдений в  $j$ -й выборке ( $j = 1, 2, \dots, c$ ),  $T_j$  – сумма рангов  $j$ -й выборки.

Частные значения модулей деформации и соответствующие им ранги приведены в таблице 4, в которой также подсчитаны суммы рангов по каждой выборке.

После присвоения рангов, представленных в таблице 4, и вычисления их суммы в каждой выборке:  $T_1 = 19$ ;  $T_2 = 36$ ;  $T_3 = 65$  выполняется проверка рангов. Для этого проверяют выполнение уравнения

$$\sum_{j=1}^c T_j = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}. \quad (9)$$

Выполнив проверку, убедимся, что

$$\sum_{j=1}^c T_j = 19 + 36 + 65 = 120;$$

$$\frac{15 \cdot (15 + 1)}{2} = 120.$$

Следовательно, ранги присвоены правильно, можно вычислять статистику  $H$ .

$$H = \left[ \frac{12}{15 \cdot (15 + 1)} \cdot \left( \frac{19^2}{5} + \frac{36^2}{5} + \frac{65^2}{5} \right) \right] -$$

$$- 3 \cdot (15 + 1) = 10,82.$$

Критическое значение критерия Kruskal–Wallis при уровне значимости  $\alpha=0,05$  для случая сравнения 3 выборок с пятью частными значениями наблюдений в каждой выборке составляет  $H_{\alpha}=5,78$ .

Так как выполняется условие  $H \geq H_{\alpha}$  ( $10,82 > 5,78$ ) нулевую гипотезу о случайных различиях выборок по уровню исследуемого

признака отклоняем. Следовательно, выборки нельзя объединить в одну совокупность.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментов и статистической обработки их экспериментальных данных установлено, что выборки частных значений модулей деформации, вычисленные по трем разным методикам, имеют существенные различия. Применение критерия Kruskal–Wallis показало, что сравниваемые выборки нельзя объединить в одну совокупность, следовательно, необходимо выбрать методику вычисления модуля деформации грунта. Из анализа методик вычисления модуля деформации следует, что расчет по формулам ПНСТ 311–2018 базируется на нелинейной зависимости осадки от давления, представляющей собой полином второй степени. Постоянные коэффициенты этого полинома легко определяются при регрессионном анализе.

В связи с этим для вычисления модуля деформации нами рекомендуется применение методики, регламентируемой ПНСТ 311–2018. Статистическая обработка данных экспериментов позволяет определять математическое ожидание модуля деформации и его расчетные значения. При этом в целях повышения надежности расчета дорожных одежд можно принимать минимальное расчетное значение модуля деформации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лунёв А. А., Сиротюк В. В., Барац Н. И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // Вестник СибАДИ. 2016. № 6 (52). С. 72–79.
2. Лунёв А. А., Сиротюк В. В., Иванов Е. В. Результаты исследований деформационных харак-

- теристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 103–110.
3. Лунёв А. А., Сиротюк В. В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2(21). С. 215–227.
  4. Лыткин А. А., Старков Г. Б., Вагнер Е. Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. № 6, Т.17. С. 764–776.
  5. Лыткин А. А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2017. № 3(55). С. 125–132.
  6. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 992, 79–85 (2020).
  7. Пролюгин А. С., Долгих Г. В., Калинин А. Л., Александрова Н. П. Влияние влажности грунта на деформационные свойства грунтощебеночных образцов при сжатии // Вестник СибАДИ. 2021. № 18(5). С. 614–632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>.
  8. Пролюгин А. С., Александров А. С., Долгих Г. В., Чусов В. В. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя // Вестник СибАДИ. 2021. № 18(6). С. 772–789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>
  9. Матвеев С. А., Немировский Ю. В. Свойства упругого слоя основания, армированного объёмной георешеткой // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 2(33). С. 24–28.
  10. Матвеев С. А., Литвинов Н. Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // Вестник СибАДИ. 2013. № 4(32). С. 57–61.
  11. Матвеев С. А., Мартынов Е. А., Литвинов Н. Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // Вестник СибАДИ. 2015. № 44(4). С. 80–86.
  12. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 94(2), 21–30 (2020).
  13. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 662, 164–167 (2014).
  14. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 587–589, 1137–1140 (2014).
  15. Chusov, V.V., Aleksandrova, N.P., Ignatov, V.F.: Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687(2), 1–7 (2019).
  16. Hirakawa, D., et al.: Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests. *Japanese Geotechnical Journal* 3(4), 307–320 (2008) (in Japanese).
  17. Kongkitkul, W., et al.: Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer. *ATRANS Research* 2(1), 1–14 (2010).
  18. Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P.: Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. *Materials Science Forum* 992, 828–835 (2020).
  19. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al.: Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. In: MATEC Web of Conferences 216, 1–9 (2018).
  20. Chen, Y., Chen, X., Bu, J.: Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 66(2), 157–163 (2018).
  21. Xu, X., New Damage Evolution Law for Steel–Asphalt Concrete Composite Pavement Considering Wheel Load and Temperature Variation. *Materials* 12, 3723 (2019).
  22. Aleksandrov, A., et al.: Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  23. Aleksandrova, N., Chusov, V., Stolbov, Y.: Damage accumulation in asphalt concrete under compression. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 982, 908–918 (2020).
  24. Rodezno, M.C., Kaloush, K.: Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design* 12(2), 423–439 (2011).
  25. Li, Q., et al.: Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation* 19(2), 114–133 (2011).
  26. Gercog, V.N., Dolgikh, G.V., Kuzin, N.V.: Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering* 5(57), 45–57 (2015).
  27. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* 143, 300–307 (2016).
  28. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236–246 (2017).
  29. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587–601 (2015).
  30. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation*

Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).

31. Aleksandrov, A., et al.: The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).

32. Zheng Su, et al.: Characterization of the Undrained Shear Strength of Expansive Soils of High Water Content. In: MATEC Web of Conferences 206, 1–5 (2018).

33. Madjadoubaye, J., Camela, W.R.: Reinforcement of Flexible Pavements by the Use of Geogrid: Case of the Road Mbalmayo - Ebolowa. Civil Engineering Research Journal 8(5), 134-138 (2019).

34. Adams, C.A., Amofa, N.Y., Opoku-Boahen R.: Effect of Geogrid Reinforced Subgrade on Layer Thickness Design of Low Volume Bituminous Sealed Road Pavements. International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) 3(7), 59-67(2014).

35. Murad Al Qurishee.: Application of Geosynthetics in Pavement Design. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 4(7), 1-7 (2017).

36. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).

37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).

38. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).

39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).

40. Ilin, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 92(8), 115–126 (2019).

41. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).

42. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).

43. Rudgalskiy, D., et al.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).

44. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological

factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), Pp. 147–155 (2020).

45. Steven, B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury. – 2005. – p. 291.

46. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2009. 392 p.

47. Пролюгин А. С., Долгих Г. В., Александров А. С. Анализ результатов трехосных испытаний связных грунтов Омской области // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 140–150.

48. Kruskal, W.H., Wallis W.A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 47(260), 583–621 (1952)

49. Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin 1(6), 80-83 (1945)

## REFERENCES

1. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnykh harakteristik zoloshlakovoy smesi // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016, 52(6): 72-79.

2. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformatsionnykh harakteristik zoloshlakovykh smesey // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017, 53(1): 103-110.

3. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopotavlenie deformatsionnykh parametrov zoloshlakovoy smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227.

4. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.YA. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd metodom holodnogo resajklinga // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020, 17(6): 764-776.

5. Lytkin A.A. Vliyaniye povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na harakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyakh dorozhnykh odezhd // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017, 55(3): 125-132.

6. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of *Belite Sludge Hardening in Pavement*. *Materials Science Forum* 992, 79–85 (2020).

7. Prolygin A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N.P. Influence of soil moisture on the deformation properties of soil-crushed stone samples during compression. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(5):614-632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632> (In Russ.)

8. Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed

- stone layer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):772-789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789> (In Russ.)
9. Matveev S.A., Nemirovskij YU.V. Svoystva uprugogo sloya osnovaniya, armirovannogo ob'yomnoj geoshetkoj // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*, 2005, 33(2): 24-28.
  10. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opreделение деформационных характеристик шпечбеночнопесчаного основания, армированного стальными геосеткой // *Vestnik SibADI*, 2013, 32(4): 57-61.
  11. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoj odezhdoy // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015, 44(4): 80-86.
  12. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 2020, 94(2), 21–30.
  13. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 2014, 662: 164-167.
  14. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 2014, 587-589, 1137-1140.
  15. Chusov, V.V., Aleksandrova, N.P., Ignatov, V.F.: Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687(2), 1-7 (2019).
  16. Hirakawa, D., et al.: Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests. *Japanese Geotechnical Journal* 3(4), 307-320 (2008) (in Japanese).
  17. Kongkitkul, W., et al.: Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer. *ATRANS Research* 2(1), 1-14 (2010).
  18. Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P.: Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. *Materials Science Forum* 992, 828–835 (2020).
  19. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al.: Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. In: MATEC Web of Conferences 216, 1–9 (2018).
  20. Chen, Y., Chen, X., Bu, J.: Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 66(2), 157-163 (2018).
  21. Xu, X., New Damage Evolution Law for Steel–Asphalt Concrete Composite Pavement Considering Wheel Load and Temperature Variation. *Materials* 12, 3723 (2019).
  22. Aleksandrov, A., et al.: Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  23. Aleksandrova, N., Chusov, V., Stolbov, Y.: Damage accumulation in asphalt concrete under compression. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 982, 908-918 (2020).
  24. Rodezno, M.C., Kaloush, K.: Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design* 12(2), 423–439 (2011).
  25. Li, Q., et al.: Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation* 19(2), 114–133 (2011).
  26. Gercog, V.N., Dolgikh, G.V., Kuzin, N.V.: Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering* 5(57), 45–57 (2015).
  27. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* 143, 300–307 (2016).
  28. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236-246 (2017).
  29. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587–601 (2015).
  30. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 66. Springer, Singapore (2020).
  31. Aleksandrov, A., et al.: The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear. In: MATEC Web of Conferences 239, 1–8 (2018).
  32. Zheng Su, et al.: Characterization of the Undrained Shear Strength of Expansive Soils of High Water Content. In: MATEC Web of Conferences 206, 1–5 (2018).
  33. Madjadoumbaye, J., Camela, W.R.: Reinforcement of Flexible Pavements by the Use of Geogrid: Case of the Road Mbalmayo - Ebolowa. *Civil Engineering Research Journal* 8(5), 134-138 (2019).
  34. Adams, C.A., Amofa, N.Y., Opoku-Boahen R.: Effect of Geogrid Reinforced Subgrade on Layer Thickness Design of Low Volume Bituminous Sealed Road Pavements. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)* 3(7), 59-67(2014).
  35. Murad Al Qurishee.: Application of Geosynthetics in Pavement Design. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 4(7), 1-7 (2017).
  36. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. *Advanced Materials Research* 1020, 31–36 (2014).

37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).

38. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).

39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).

40. Ilna, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 2019, 92(8): 115–126.

41. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 753: 1-5. IOP Publishing Ltd.

42. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 2014, 45(2): 217–224.

43. Rudgalskiy, D., et al.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1614: 1-9. IOP Publishing Ltd.

44. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 2020, 93(1): 147–155.

45. Steven, B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2005. 291 p.

46. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, in the University of Canterbury, 2009. 392 p.

47. Prolygin A. S., Dolgih G. V., Aleksandrov A. S. Analysis of the results of triaxial tests of cohesive soils in the Omsk region. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2021, 6 (89) :140–150.

48. Kruskal, W.H., Wallis W.A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 1952, 47(260): 583–621.

49. Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1945, 1(6) : 80-83.

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Пролыгин А.С. Произвел штамповые испытания, статистическую обработку результатов эксперимента.*

*Калинин А.Л. Произвел разработку методики экспериментального исследования и статистическую обработку результатов эксперимента в части применения критерия W.H. Kruskal, W.A. Wallis.*

*Александров А.С. Написание текста статьи.*

*Александрова Н.П. Постановка задачи, редактирование текста статьи.*

### COAUTHORS ' CONTRIBUTION

*Aleksandr S. Prolygin performed stamp tests, statistical processing of the experiment results.*

*Alexandr L. Kalinin developed the methodology of experimental research and statistical processing of the experimental results in terms of applying W. H. Kruskal, W. A. Wallis criterion.*

*Anatoliy S. Aleksandrov wrote the text of the article.*

*Natalia P. Alexandrova made the statement of the problem, edited the text of the article.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Калинин Александр Львович – ст. препод. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

*Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Alexandr L. Kalinin – Senior Teacher of the Roads Construction and Operation Department.*

*Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Roads Construction and Operation Department,*

*Aleksandr S. Prolygin – Postgraduate student, the Roads Construction and Operation Department.*

*Natalia P. Alexandrova – Cand. of Sci., Associate Professor the Roads Construction and Operation Department.*

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

**1. УДК.** На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

**2. Заглавие статьи.** Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

**3. Фамилии авторов.** Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

**4. Аннотация.** Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала [vestnik.sibadi.org](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 представлено 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 А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисовочной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

**Общий порядок опубликования**

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

**Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация).** Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

**Рецензирование.** Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

**Редакционная подготовка.** Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

**Публикация.** Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.