

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 20, № 1. 2023
Vol.20, No. 1. 2023

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: 10.26518/2071-7296-2023-20-1

ТОМ 20, № 1. 2023

VOL. 20, No. 1. 2023

Сквозной номер выпуска – 89

Continuous issue – 89

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) 65-03-23;

АДРЕС РЕДАКЦИИ

644080, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 60-71-26;

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) 65-03-23

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

644080, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 60-71-26

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

www.vestnik.sibadi.org
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2023

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 серьёзно 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:

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки),

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),

2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки),

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

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

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»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 20.02.2023. Дата выхода в свет 13.03.2023. 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)», 2023

"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

2.5.11. – Ground transport and technological systems and complexes (technical sciences),

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

2.9.4. – Management of the transportation process (Technical Sciences),

2.9.5. – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

2.1.1. – Building structures, buildings and facilities (Technical Sciences),

2.1.5. – Building materials and products (Technical Sciences),

2.1.7. – Technology and organization of construction (Technical Sciences),

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

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

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 Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

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 20.02.2023. Publication date is 13.03.2023. 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)", 2023

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

Трояновская Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017, **ORCID ID** 0000-0003-2763-0515

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

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

Трофимова Людмила Семеновна, д-р техн. наук, доц. Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия.
Scopus Author ID 57212171087, **ORCID ID** 0000-0001-7312-1557

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, **ORCID ID** 0000-0003-2254-8803

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** 0000-0002-2409-4078

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

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРП», г. Сургут, Россия
Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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, **ORCID ID** 0000-0001-6154-1263

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

Кондаков Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины». Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018, **ORCID ID** 0000-0001-6818-1694

Копаница Наталья Олеговна, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительные материалы и технологии». Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия.
Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016, **ORCID ID** 0000-0002-0991-8550

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Россия
Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

Кортаев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф. Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия.
Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017, **ORCID ID** 0000-0002-5957-4135

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, **Scopus Author ID** 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017

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** 0000-0002-4026-820X

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
Scopus Author ID 57200729552, **Researcher ID** AAU-8361-2020, **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, **Researcher ID** Y-3137-2018
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, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

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, **Researcher ID** M-8151-2017, **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, **Researcher ID** A-4081-2019, **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

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
Scopus Author ID 57216812633, **Author ID в РИНЦ** 595504

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

Чжаньпин, Ph.-D., профессор Мичиганского технологического университета, Хаутон, США.
Scopus Author ID 14420403300, **Researcher ID** P-4406-2015, **ORCID ID** 0000-0002-9103-6599

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

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

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

Куприна Татьяна Васильевна редактор-ответственный секретарь
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

Irina P. Troyanovskaya, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID ID 0000-0003-2763-0515

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

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

Liudmila S. Trofimova, 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 57212171087, **ORCID ID** 0000-0001-7312-1557

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,
ORCID ID 0000-0003-2254-8803

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 0000-0002-2409-4078

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, **Researcher ID** AAM-4262-2021,
ORCID ID 0000-0001-7843-7278

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,
ORCID ID 0000-0001-6154-1263

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

Sergey V. Kondakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018,
ORCID ID 0000-0001-6818-1694

Natalia O. Kopanitsa, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016,
ORCID ID 0000-0002-0991-8550

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

Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

Dmitriy N. Korotaev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, Moscow, Russia.

Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017,
ORCID ID 0000-0002-5957-4135

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

Scopus Author ID 57196729393, **Researcher ID** A-6227-2017,
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 0000-0002-4026-820X

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, **Scopus Author ID** 57200729552,
Researcher ID AAU-8361-2020

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, **Researcher ID** Y-3137-2018,
ORCID ID 0000-0002-7836-2242

Taalaibek 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, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

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, **Researcher ID** M-8151-2017 **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, **Researcher ID** A-4081-2019

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

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

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

Zhirkalbek S. Sharshembiev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin, Bishkek, Kyrgyz Republic,
Scopus Author ID 57216812633, **Author ID** в РИНЦ 595504

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

Zhanping You, Professor, Michigan Technological University, Houghton, USA
Scopus Author ID 14420403300, **ORCID ID** 0000-0002-9103-6599, **Researcher ID** P-4406-2015

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

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

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

Tatyana V. Kuprina
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

Natalia 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. Г. Зедгенизов, С. Х. Файзов

**ВЛИЯНИЕ ТОЧКИ ПРИЛОЖЕНИЯ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ В ДВУХМАССОВОЙ
КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ..... 12**

И. С. Кузнецов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ДЛЯ РЕМОНТА ТРУБОПРОВОДА..... 24**

А. Н. Назаров

**ДВИЖУЩЕЕ УСИЛИЕ ДВИГАТЕЛЯ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КРАНОВ
МОСТОВОГО ТИПА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ..... 34**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

И. Е. Агуреев, А. В. Ахромешин, В. А. Пышный

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ «О РАВНОВЕСИЯХ (РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЯХ)»
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДА..... 52**

М. В. Банкет, Д. В. Шаповал, И. А. Эйхлер, Д. С. Алешков, И. В. Погуляева

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЗАТРАТ НА ЗАПРАВКУ РАЗЛИЧНЫМИ
ВИДАМИ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ КАТЕГОРИИ N1..... 76**

Е. В. Печатнова, К. С. Нечаев

**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АВАРИЙНО-ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ..... 92**

Л. С. Трофимова, А. С. Вахрушев

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ
ОСОБЕННОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА..... 102**

Н. В. Хольшев, А. Ю. Конев, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ
ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК.....114**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, О. М. Шеметова, Л. Х. Загороднюк, А. Л. Бочарников

**СМЕШЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ
СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ..... 126**

С. А. Макеев, Н. Г. Силина, М. А. Ступин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК
С ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ СОРТАМЕНТА ZEMAN 138**

Н. М. Толыпина, Е. Н. Хахалева, Д. А. Толыпин

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНОСТИ КВАРЦЕВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ 150

А. В. Явинский, И. Л. Чулкова

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО 158

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Viktor G. Zedgenizov, Sorbon Kh. Faizov

IMPACT OF FORCE APPLICATION POINT IN TWO-MASS OSCILLATION SYSTEM ON ITS ENERGY EFFICIENCY	13
--	-----------

Ilya S. Kuznetsov

DETERMINATION OF TORQUE FOR MILLING WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR WHEN REPAIRING A PIPELINE	25
---	-----------

Aleksandr N. Nazarov

MOTOR DRIVING FORCE OF BRIDGE-TYPE CRANE LIFTING MECHANISM UNDER REAL OPERATING USE	35
--	-----------

PART II. TRANSPORT

Igor E. Agureev, Andrey V. Akhromeshin, Vladislav A. Pyshnyi

EQUILIBRIA (EQUILIBRIUM STATES) PROBLEM STATEMENT FOR CITY TRANSPORT SYSTEMS	53
---	-----------

Mikhail V. Banket, Dmitrii V. Shapoval, Ivan A. Eychler, Denis S. Aleshkov, Irina V. Pogulyaeva

COST CALCULATION METHOD DEVELOPMENT FOR VARIOUS TYPES OF ENGINE FUEL FILLING FOR FIRST CATEGORY AUTOMOBILES	77
--	-----------

Elena V. Pechatnova, Konstantin S. Nechaev

FACTORS FOR TRAFFIC ACCIDENT-PRONE SECTION FORMATION ON FEDERAL ROADS	93
--	-----------

Liudmila S. Trofimova, Sergei S. Vakhrushev

PLANNING OF ROLLING STOCK OPERATION CONSIDERING SPECIFIC FEATURES OF ROAD TRAFFIC MANAGEMENT WHEN TRANSPORTING GOODS IN THE FAR NORTH	103
--	------------

Nikolai V. Holshev, Andrei Y. Konev, Sergei M. Vedishchev, Aleksei V. Prokhorov

METHOD AND RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENTS OF SOME AUTOMOBILE BRAKE SHOE.....	115
---	------------

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Olga M. Shemetova, Lilia Kh. Zagorodnuk, Andrey L. Bocharnikov

MIXING OF HEAT-INSULATING MIXTURES IN PNEUMATIC MIXER WITH SPIRAL ENERGY CARRYING TUBE	127
---	------------

Sergey A. Makeyev, Natalia G. Silina, Mikhail A. Stupin

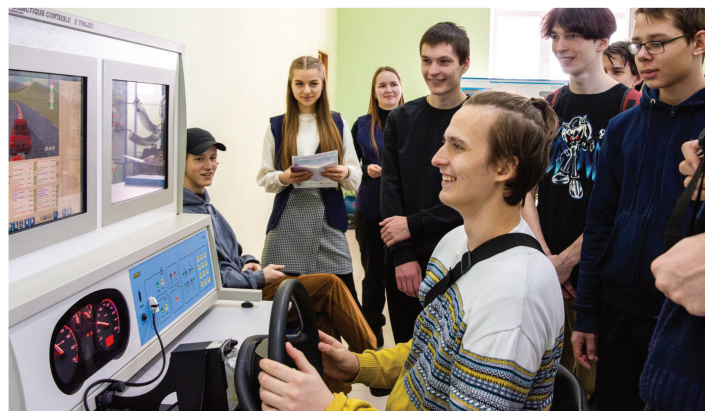
INVESTIGATION OF THE OVERALL STABILITY OF WELDED I-BEAMS WITH A CROSS-CORRUGATED WALL OF THE ZEMAN RANGE	139
---	------------

Natalia M. Tolypina, Elene N. KHakhaleva, Daniil A. Tolypin

QUARTZ MICROFILL DISPERSION OPTIMISATION	151
---	------------

Aleksander V. Yavinsky, Irina L. Chulkova

KINETICS OF MIXED BINDER STRENGTH GAIN.....	159
--	------------



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



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

Научная статья

УДК 621.01

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

EDN: KEIWXK



ВЛИЯНИЕ ТОЧКИ ПРИЛОЖЕНИЯ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ В ДВУХМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

В. Г. Зедгенизов*, С. Х. Файзов*Иркутский национальный исследовательский технический университет**г. Иркутск, Россия**vzedgenizov@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5141-0876>**sorbon2018@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4428-9999>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данной статьи является выполнение сравнительного анализа энергозатрат при работе резонансной двухмассовой механической системы в зависимости от точки приложения вынуждающей силы к первой или ко второй массе. Объектом исследований является колебательная система вибромашины, состоящая из двух масс, связанных между собой упругим и диссипативным элементом. Кроме того, первая масса через упругий и диссипативный элемент соединена с неподвижным основанием.

Материалы и методы. В исследованиях использованы основные положения теоретической механики, математического моделирования и имитационного эксперимента в среде Matlab-Simulink.

Результаты. По результатам исследований на математической модели двухмассовой колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к первой массе установлено, что при вынуждающей силе 10 кН и частоте 80 рад/с амплитуда колебаний первой массы составляет 0,6 мм, а второй – 1,8 мм, при этом коэффициент усиления по амплитуде составляет 3,94. Для достижения указанной вынуждающей силы дебалансный возбудитель направленного действия при массе дебалансов 10 кг должен иметь эксцентриситет – 0,16 м, а мощность, необходимую на привод возбудителя колебаний – 21,2 кВт. В случае приложения вынуждающей силы ко второй массе достичь той же амплитуды колебаний первой массы (0,6 мм) можно при вынуждающей силе 5 кН, эксцентриситете 0,078 м и мощности на привод возбудителя 4,9 кВт, при этом коэффициент усиления по амплитуде составляет 8,44.

Выводы. Таким образом, в силу динамических свойств двухмассовой системы вариант с точкой приложения вынуждающей силы ко второй массе оказывается в 4,3 раза энергоэффективнее по сравнению с вариантом приложения вынуждающей силы к первой массе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двухмассовая колебательная система, амплитуда колебаний, точка приложения вынуждающей силы, энергоэффективность

Статья поступила в редакцию 14.01.2023; одобрена после рецензирования 03.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Влияние точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе на ее энергоэффективность // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

© Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin alarticle

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

EDN: KEIWXK

IMPACT OF FORCE APPLICATION POINT IN TWO-MASS OSCILLATION SYSTEM ON ITS ENERGY EFFICIENCY

Viktor G. Zedgenizov*, Sorbon Kh. Faizov

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

vzedgenizov@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5141-0876>

sorbon2018@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4428-9999>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The goal is to perform a comparative analysis of energy consumption during the operation of a resonant two-mass mechanical system, depending on the point of application of the driving force to the first or second mass. The object of research is an oscillatory system of a vibrating machine consisting of two masses interconnected by elastic and dissipative elements. In addition, the first mass is connected to a fixed base through elastic and dissipative elements.

Materials and methods. The research uses the main provisions of theoretical mechanics, mathematical modeling and simulation experiment in the Matlab-Simulink environment.

Results. According to the results of research on a mathematical model of a two-mass oscillatory system with a point of application of the driving force to the first mass, it was found that with a driving force of 10 kN and a frequency of 80 rad/s, the amplitude of the oscillations of the first mass is 0,6 mm, and the second is 1,8 mm, while the amplitude gain is 3,94. To achieve the specified driving force, a directional debalance exciter with a mass of 10 kg of debalances must have an eccentricity of 0,16 m, and the power required to drive the oscillation exciter is 21,2 kW. In the case of applying a driving force to the second mass, it is possible to achieve the same amplitude of oscillations of the first mass (0,6 mm) with a driving force of 5 kN, an eccentricity of 0,078 m and a drive power of 4,9 kW, while the amplitude gain is 8,44.

Originality. Thus, due to the dynamic properties of the two-mass system, the option with the point of application of the driving force to the second mass is 4,3 times more energy efficient than the option of applying the driving force to the first mass.

KEYWORDS: two-mass oscillatory system, oscillation amplitude, the point of application of the driving force, energy efficiency

The article was submitted 14.01.2023; approved after reviewing 03.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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. Zedgenizov Viktor G., Faizov Sorbon Kh. Impact of force application point in two-mass oscillation system on its energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

© Zedgenizov V. G., Faizov S. Kh., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительном комплексе широко используются вибрационные технологические машины с дебалансными вибровозбудителями (виброконвейеры, виброгрохоты, вибрационные мельницы и т.д.). Одним из путей повышения энергоэффективности вибрационных машин является использование резонансного режима, при котором рабочему органу сообщаются колебания, близкие к его собственной частоте^{1, 2, 3, 4} [1, 2].

Резонансный режим позволяет исключить влияние упругих и инерционных сил в системе. Мощность привода вибрационной машины идет на компенсацию исключительно диссипативных сил. Резонансная настройка существенно снижает потребляемую мощность, при этом наблюдается улучшение конструктивных, динамических и эксплуатационных характеристик машины [3, 4].

Однако резонансные системы имеют свои недостатки. Из-за остроты резонансного пика появляется неустойчивость рабочего режима при изменении нагрузки или частоты вынуждающей силы. Эта неустойчивость часто является причиной нарушения технологического процесса, что препятствует широкому внедрению высокоэффективных резонансных вибромашин [5, 6].

С целью расширения резонансной зоны в структуру машин вводится дополнительная масса [7]. При этом вынуждающая сила может быть приложена как к рабочему органу, так и к дополнительной массе.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ энергозатрат при работе резонансной двухмассовой механической системы в зависимости от точки приложения вынуждающей силы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве прототипа выбрана резонансная виброплощадка 7452, которая входит в

состав комплекта оборудования для изготовления плит перекрытий размером 3х6 м. Техническая характеристика прототипа⁵:

- грузоподъемность, кг – 8000;
- амплитуда колебаний, мм – 0,4...0,6;
- масса виброгруппы, кг – 575;
- установленная мощность, кВт – 18,5.

На рисунке 1 представлена расчетная схема прототипа с приложением вынуждающей силы к массе m_1 .

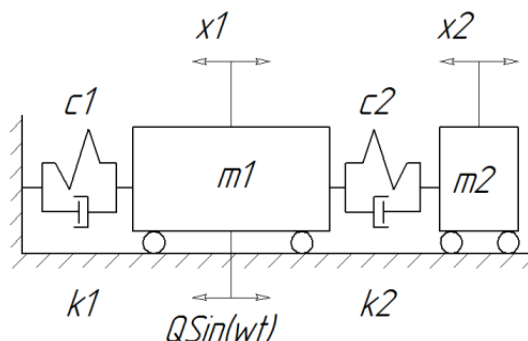


Рисунок 1 – Расчетная схема двухмассовой колебательной системы с приложением вынуждающей силы к массе m_1
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Design scheme of a two-mass oscillatory system with the application of a driving force to the mass m_1
Source: compiled by the authors.

Колебательная система состоит из двух масс m_1 и m_2 , связанных между собой упругим c_2 и диссипативным k_2 элементами. Кроме того, первая масса через упругий c_1 и диссипативный k_1 элементы соединена с неподвижным основанием. Масса m_1 имитирует рабочий орган вибрационной машины, масса m_2 служит для коррекции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Вариант 1: вынуждающая сила $Q \cdot \sin(\omega t)$ приложена к массе m_1 .

Движение системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений [8]:

¹ Лян И. П., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. К вопросу об энергопотреблении вибрационных технологических машин // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИК-МУС-2019): сб. тр. конф. М., 2019. С. 334–337.

² Пановко Г. Я., Шохин А. Е. К вопросу о резонансной настройке транспортно-технологических вибростанов // Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем: сб. тр. XVIII Междунар. симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. А.Е. Кобринского. М., 2015. С. 213–217.

³ Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.

⁴ Быховский И. И., Попов С. И. Автоматизация резонансных вибростанов. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1972. 162 с.

⁵ Энциклопедия по машиностроению <https://mash-xxl.info/page/0411990621800182361761260360550961460320000872> 01/ (дата обращения: 06.01.2023)

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 \frac{dx_1}{dt} + k_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = Q \sin(\omega t),$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_2 (x_1 - x_2) = 0,$$

где m_1 и m_2 – первая и вторая массы колебательной системы; x_1 и x_2 – перемещения первой и второй массы соответственно; k_1 и k_2 – коэффициенты демпфирования масс; c_1 и c_2 – коэффициенты жесткости упругих элементов; $Q \cdot \sin(\omega t)$ – вынуждающая сила.

Уравнение (1) определяет перемещение массы m_1 , а уравнение (2) – перемещение массы m_2 .

Для получения АЧХ колебательной системы в среде Matlab-Simulink разработана схема, которая представлена на рисунке 2 [9, 10, 11, 12].

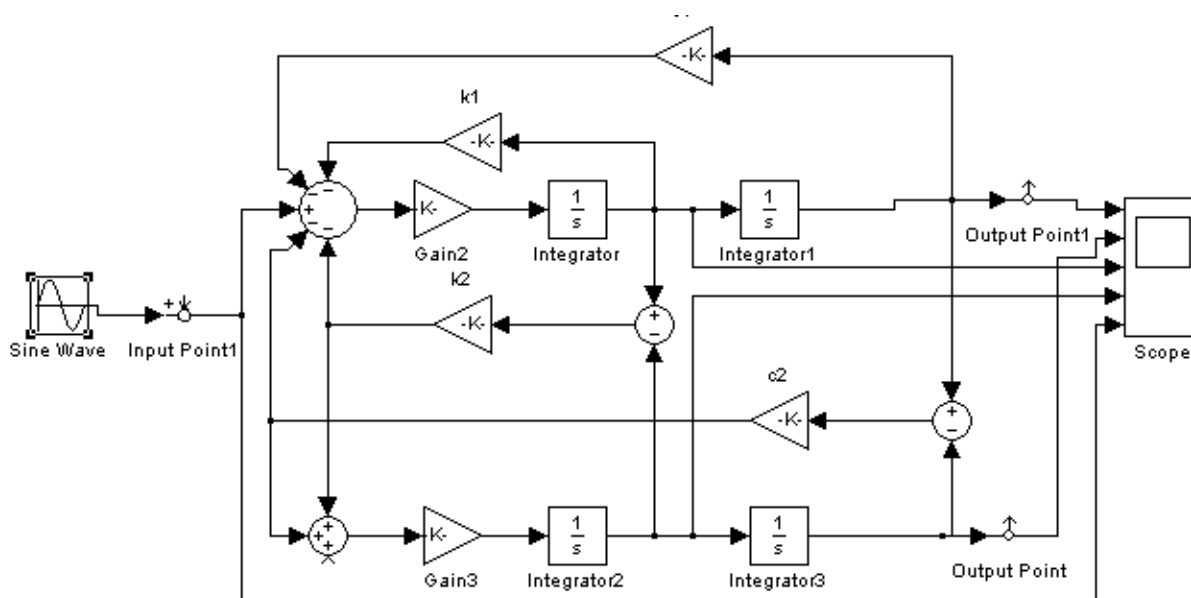


Рисунок 2 – Схема решения в Matlab-Simulink

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of the solution in Matlab-Simulink

Source: compiled by the authors.

Входной сигнал формирует блок *InputPoint 1*, отклик системы в виде амплитуды перемещений первой и второй масс снимается с *OutputPoint 1* и *OutputPoint* и регистрируется в *Scope*.

Параметры колебательной системы настроены на режим работы с расширенной резонансной зоной для первой массы m_1 и представлены в таблице 1.

Таблица 1
Основные параметры резонансной двухмассовой колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_1

Источник: составлено авторами.

Table 1
The main parameters of a resonant two-mass oscillatory system with a point of application of the driving force to m_1 mass

Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	m_1 , кг	m_2 , кг	c_1 , кН/м	c_2 , кН/м	k_1 , кНс/м	k_2 , кНс/м
Значение	8 000	500	60 000	3 200	70	15

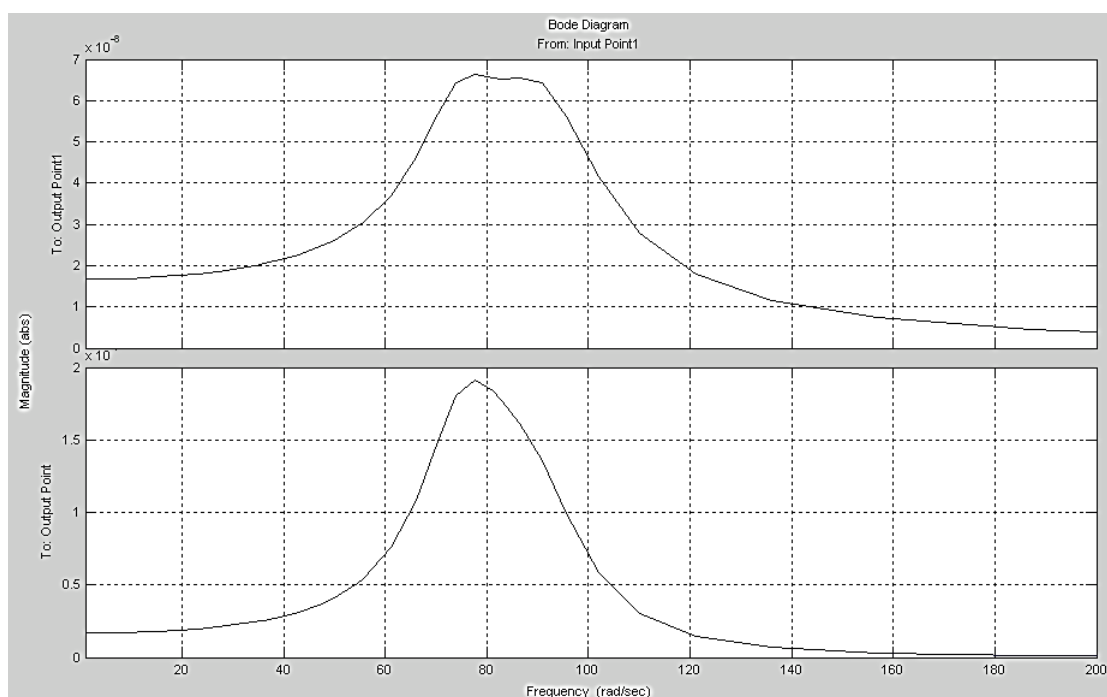


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика резонансного режима двухмассовой колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_1
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Frequency response of the resonant mode of a two-mass oscillatory system with the point of application of the driving force to the mass m_1
Source: compiled by the authors.

На рисунке 3 представлена резонансная АЧХ колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_1 . Верхний график представляет собой зависимость амплитуды колебаний первой массы m_1 от частоты вынуждающей силы, нижний – то же для второй массы m_2 .

Для массы m_1 наблюдается расширенная резонансная зона на частоте 70–90 рад/с, при этом коэффициент динамичности составляет

$$A_1 = \frac{x_{1\max}}{x_{\text{стат.}}} = \frac{6,56 \cdot 10^{-8}}{1,67 \cdot 10^{-8}} = 3,94,$$

где $x_{1\max}$ – резонансное значение амплитуды колебаний массы m_1 ; $x_{\text{стат.}}$ – перемещение массы m_1 под действием статического усилия.

Разработанная схема решения в Matlab-Simulink (см. рисунок 2) позволяет получить зависимость амплитуды колебаний обеих

масс от величины вынуждающей силы. На рисунке 4 представлен фрагмент решения уравнений (1).

Следует отметить, что перемещения масс сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол 90° , а вынуждающая сила совпадает по фазе со скоростью перемещения первой массы m_1 . Это говорит о том, что наблюдается резонансный режим.

В результате имитационного эксперимента получена зависимость амплитуды колебаний масс x_1 и x_2 от величины вынуждающей силы Q , приложенной к первой массе m_1 (рисунок 5).

При вынуждающей силе $Q=10\,000$ Н и частоте $\omega=80$ рад/с амплитуда колебаний массы m_1 составляет 0,6 мм, а массы m_2 – 1,8 мм. Для достижения указанной вынуждающей силы дебалансный возбудитель направленного действия при массе дебалансов 10 кг должен иметь эксцентриситет:

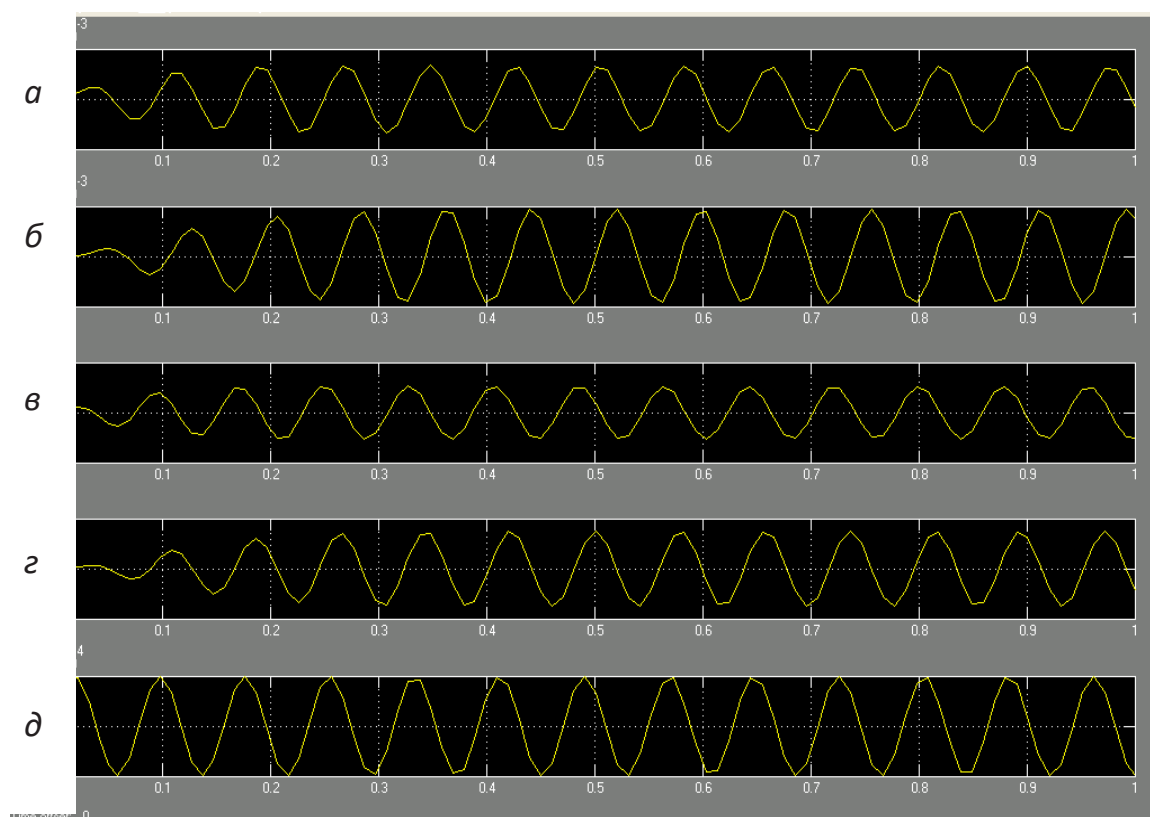


Рисунок 4 – Решение системы уравнений (1): а – перемещение массы m_1 (м); б – перемещение массы m_2 (м); в – скорость массы m_1 (м/с); г – скорость массы m_2 (м/с); д – величина вынуждающей силы $\bar{Q}$ (Н)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Solution of the system of equations (1): a – displacement of m_1 mass (m); б – displacement of m_2 mass (m); в is the velocity of m_1 mass (m/s); г is the velocity of m_2 mass (m/s); д is the magnitude of driving force Q (N)
Source: compiled by the authors.

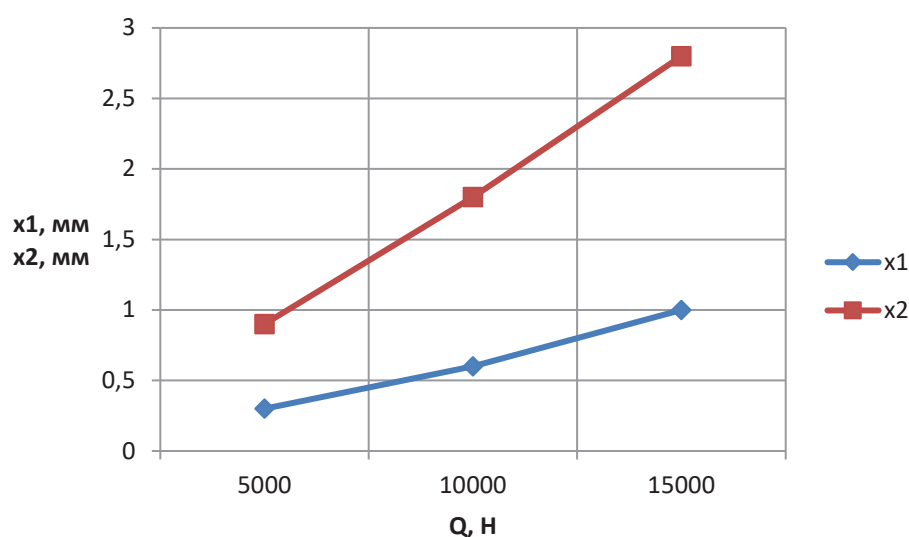


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебаний масс x_1 и x_2 от величины вынуждающей силы Q , приложенной к первой массе m_1
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the amplitude of the oscillations of x_1 and x_2 masses on the magnitude of Q driving force applied to m_1 first mass
Source: compiled by the authors.

$$r = \frac{Q \cdot \sin \omega t}{m \omega^2} = \frac{10000}{10 \cdot 6400} = 0,16 \text{ м.}$$

Тогда мощность, необходимая на привод возбудителя колебаний, составит [13, 14, 15, 16, 17]:

$$N = \frac{m r^2 \omega^3}{2\pi} = \frac{10 \cdot 0,026 \cdot 512000}{6,28} = 21,2 \text{ кВт.}$$

Вариант 2: вынуждающая сила $Q \cdot \sin(\omega t)$ приложена к массе m_2 (рисунок 6).

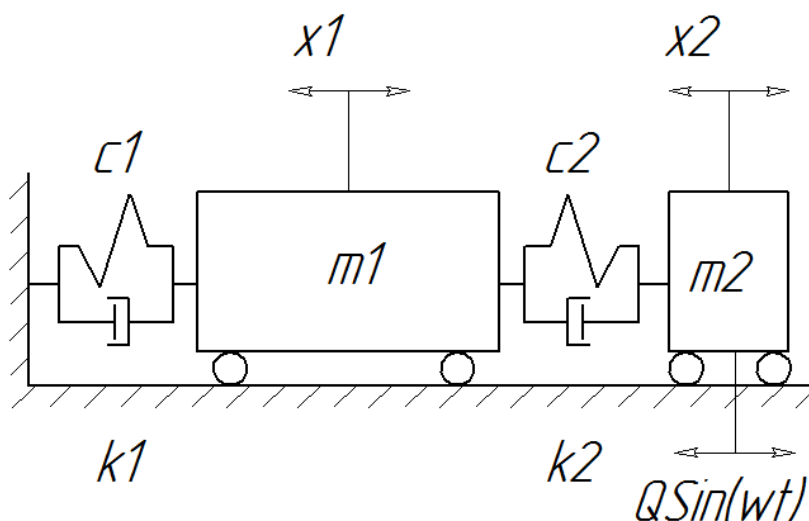


Рисунок 6 – Расчетная схема двухмассовой колебательной системы с приложением вынуждающей силы к массе m_2
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Calculation scheme of a two-mass oscillatory system with the application of a driving force to m_2 mass
Source: compiled by the authors.

Движение системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 \frac{dx_1}{dt} + k_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) &= 0, \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_2 (x_1 - x_2) &= Q \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (1)$$

Для получения АЧХ колебательной системы в среде Matlab-Simulink использовалась схема, представленная на рисунке 2, с той лишь разницей, что InputPoint 1 соединялся со входом сумматора нижней цепочки блоков, которая формирует перемещение второй массы m_2 . Параметры колебательной системы настроены на режим работы с расширенной резонансной зоной и представлены в таблице 2.

Таблица 2
Основные параметры резонансной двухмассовой колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_2
Источник: составлено авторами.

Table 2
The main parameters of a resonant two-mass oscillatory system with a point of application of the driving force to m_2 mass
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$c_1, \text{кН/м}$	$c_2, \text{кН/м}$	$k_1, \text{кНс/м}$	$k_2, \text{кНс/м}$
Значение	8 000	500	60 000	2 600	70	14

На рисунке 7 представлена резонансная АЧХ колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_2 .

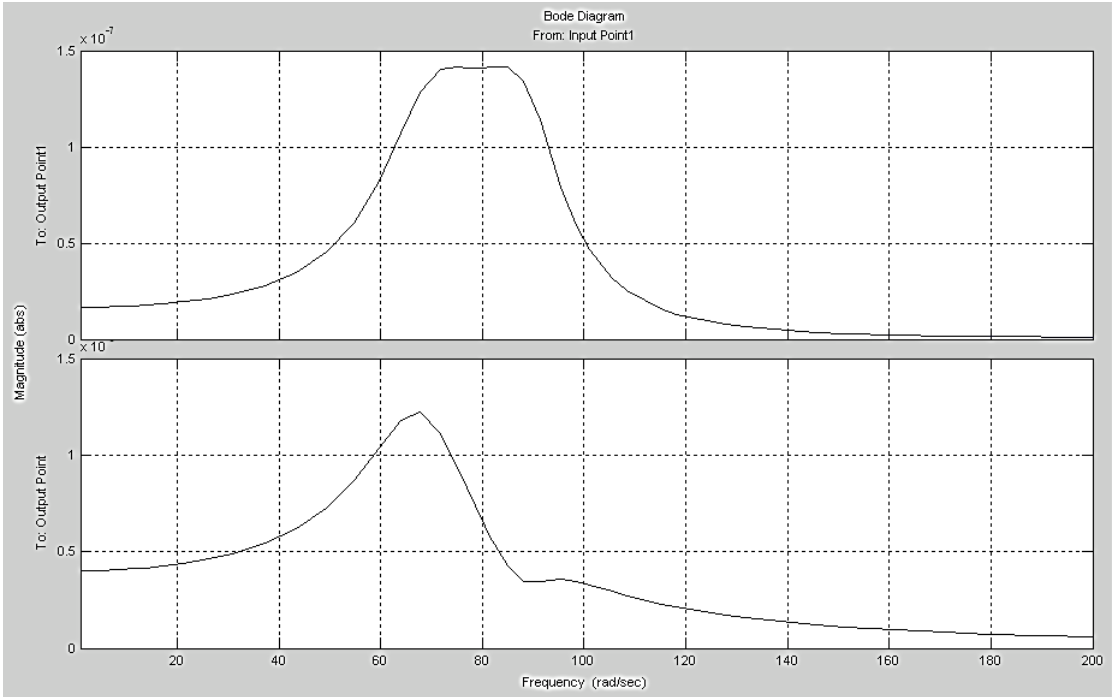


Рисунок 7 – Амплитудно-частотная характеристика резонансного режима двухмассовой колебательной системы с точкой приложения вынуждающей силы к массе m_2
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Frequency response of the resonant mode of a two-mass oscillatory system with the point of application of the driving force to m_2 mass
Source: compiled by the authors.

Верхний график представляет собой зависимость амплитуды колебаний первой массы m_1 от частоты вынуждающей силы, нижний – то же для второй массы m_2 .

Для массы m_1 также наблюдается расширенная резонансная зона на частоте 70–90 рад/с, при этом коэффициент динамичности составляет

$$A_1 = \frac{x_{1 \max}}{x_{\text{стат.}}} = \frac{1,41 \times 10^{-7}}{0,19 \times 10^{-7}} = 7,42.$$

Рисунок 2 позволяет получить зависимость амплитуды колебаний обеих масс от величины вынуждающей силы. На рисунке 8 представлен фрагмент решения уравнений (2).

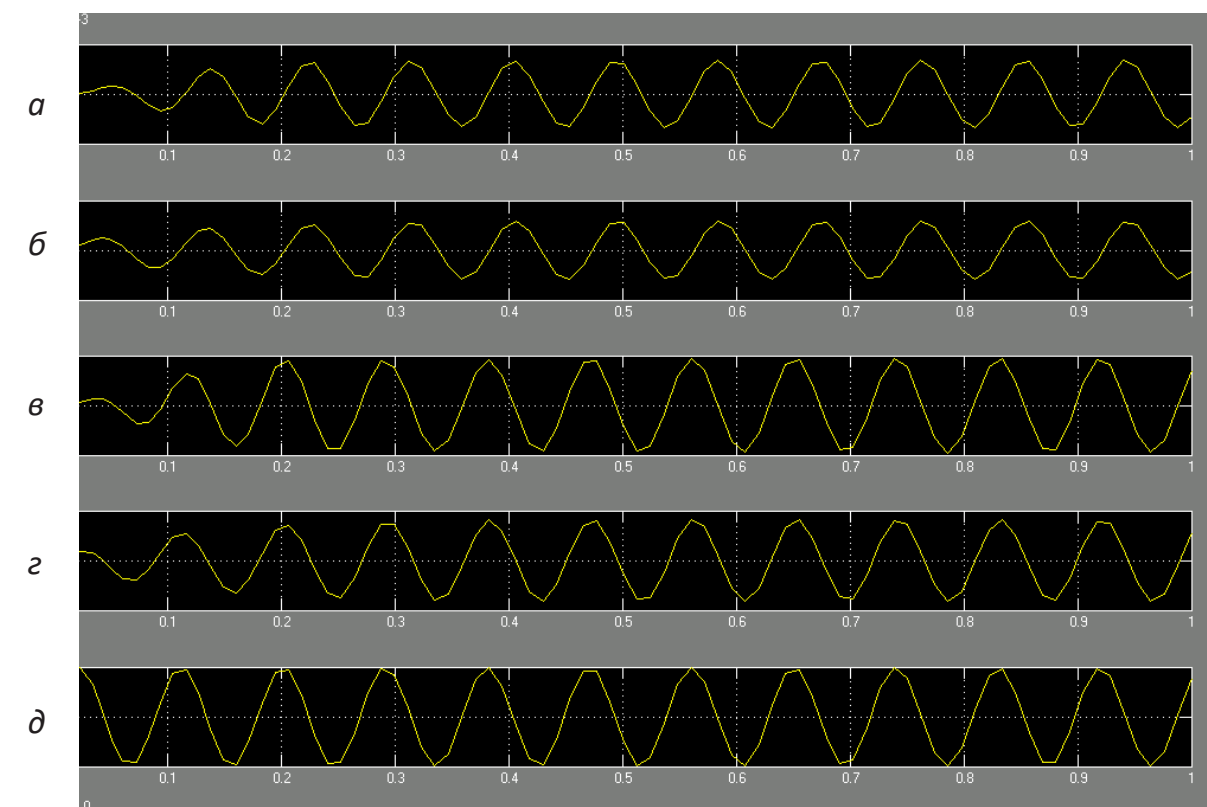


Рисунок 8 – Решение системы уравнений (2): а – перемещение массы m_1 (м); б – перемещение массы m_2 (м); в – скорость массы m_1 (м/с); г – скорость массы m_2 (м/с); д – величина вынуждающей силы Q (Н)
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Solution of the system of equations (2): а – displacement of m_1 mass (m); б – displacement of m_2 mass (m); в is the velocity of m_1 mass (m/s); г is the velocity of m_2 mass (m/s); д is the magnitude of Q driving force (N)
Source: compiled by the authors.

На рисунке 9 представлена зависимость амплитуды колебаний массы m_1 от величины вынуждающей силы для варианта 2.

Амплитуда колебаний массы m_1 на частоте $\omega=80$ рад/с достигает $x_1=0,6$ мм при вынуждающей силе $Q=5\,000$ Н. Для этого дебалансный возбудитель при массе дебалансов 10 кг должен иметь эксцентриситет:

$$r = \frac{Q \cdot \sin \omega t}{m \omega^2} = \frac{5000}{10 \cdot 6400} = 0,078 \text{ м.}$$

Мощность на привод возбудителя составит

$$N = \frac{mr^2 \omega^3}{2\pi} = \frac{10 \cdot 0,006 \cdot 512000}{6,28} = 4,9 \text{ кВт.}$$

Второй вариант в 4,3 раза энергоэффективнее первого ввиду существенной разницы между первой и второй массами. Для вывода на резонансный режим колебаний первой массы с амплитудой $x_1=0,6$ мм требуется приложить к ней вынуждающую силу $Q=10\,000$ Н, в то время как вторую массу можно «раскачать» до $x_2=6$ мм вынуждающей силой $Q=5\,000$ Н.

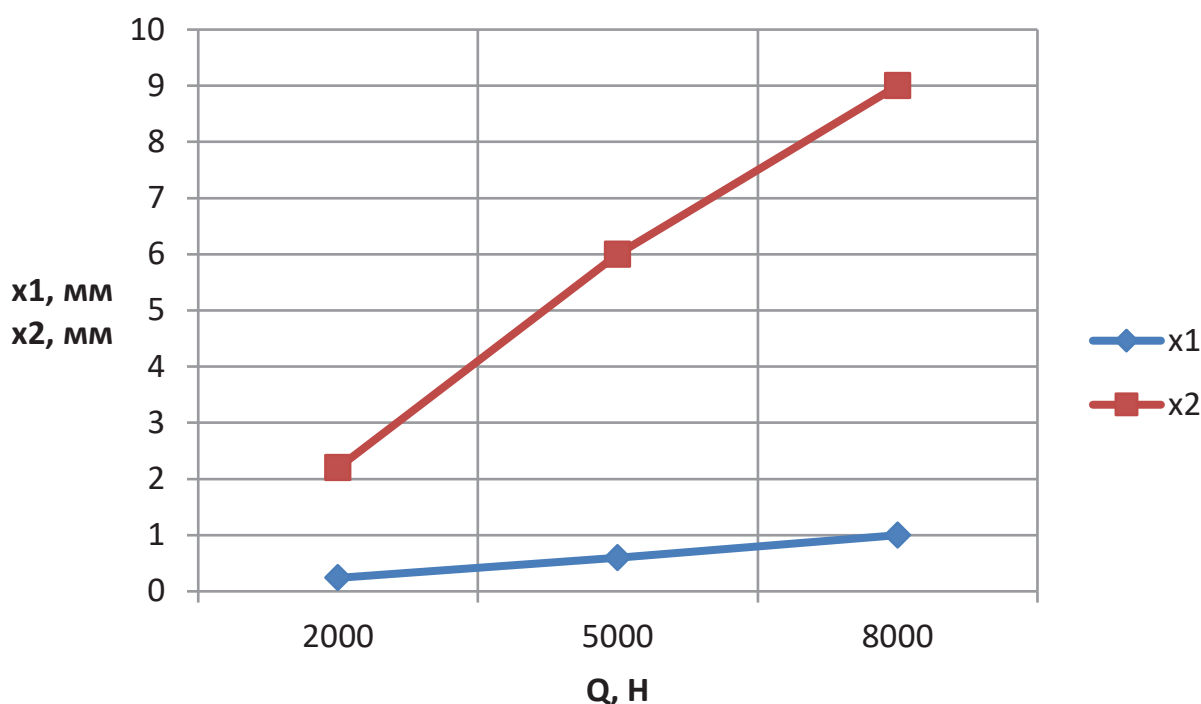


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды колебаний масс x_1 и x_2 от величины вынуждающей силы Q , приложенной ко второй массе m_2
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Dependence of the amplitude of the oscillations of x_1 and x_2 masses on the magnitude of Q driving force applied to the second m_2 mass
Source: compiled by the authors.

При этом в силу динамических свойств двухмассовой системы первая масса будет колебаться с той же амплитудой $x_1 = 0,6$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе существенно влияет на ее эффективность. В силу динамических свойств вариант с приложением вынуждающей силы к массе m_2 оказывается в 4,3 раза энергоэффективнее по сравнению с приложением силы к массе m_1 .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черноусько Ф. Л., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 383 с.
2. Скубов Д. Ю., Ходжаев К. Ш. Нелинейная электромеханика. М.: Физматлит, 2003. 360 с.
3. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРОРАН, 2000. 654 с.

4. Yaroshevich N.P., Zabrodets I.P., Yaroshevich T.S. Dynamics of starting of vibrating machines with unbalanced vibroexciters on solid body with flat vibrations // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 849. P. 36–45.

5. Дмитриев В. Н., Горбунов А. А. Резонансный вибрационный электропривод машин и установок с автоматическим управлением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 3. С. 310–314.

6. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 19–25.

7. Федоренко И. Я., Гнездилов А. А. Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 3. С. 179–183.

8. Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические ха-

рактические // iPolytech Journal. 2022. Т. 26, № 2. С. 164–172.

9. Zhakash A., Talasbaev A.A., Raymova A. Selfsynchronization of two one massin resonant vibrators // Theoretical & Applied Science. 2015. Vol. 26. Iss. 6. Pp. 48–51.

10. Асташев В. К. О новых направлениях использования явления резонанса в машинах // Вестник научно-технического развития. 2011. № 8(48). С. 10–15.

11. Бенькович Е. С. Практическое моделирование динамических систем. СПб.: БХВ-Петербург. 2002. 464 с.

12. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 290 с.

13. Garanin A. Yu., Silaeva E. V., Shlegel' O. A., Popenko V. N. DC electromagnet traction force calculation // Электротехника. 2003. № 2. С. 55–58.

14. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous motions near critical speeds in a single-plane autobalancing device // Technische Mechanik. 2004. Vol. 24. P. 25–36.

15. Lu Chung-Jen, Tien Meng-Hsuan. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 32. P. 251–268.

16. Artyunin A. I., Elisayev S. V. Effect of «crawling» and peculiarities of motion of a rotor with pendular selfbalancers // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 373–375. P. 38–42.

17. Картавый А. Н. Механизм возбуждения колебаний и затраты мощности дебалансными вибро-возбудителями // Горное оборудование и электро-механика. 2008. № 9. С. 34–40.

REFERENCES

1. Chernous'ko F. L., Akulenko L. D., Sokolov B. N. *Upravlenie kolebaniyami* [Control of oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1980: 383. (In Russ.)

2. Skubov D. Yu., Khodzhaev K. Sh. *Nelineinaya elektromekhanika* [Nonlinear electromechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2003: 360. (In Russ.)

3. Schreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN Publ., 2000: 654. (In Russ.)

4. Yaroshevich N. P., Zabrodets I. P., Yaroshevich T. S. Dynamics of starting of vibrating machines with unbalanced vibroexciters on solid body with flat vibrations. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 849: 36–45.

5. Dmitriev V.N., Gorbunov A.A. Rezonansnyi vibratsionnyi elektroprivod mashin i ustanovok s avtomaticheskim upravleniem [Resonant vibration electric drive of machines and installations with automatic control]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2009; Vol. 11, no 3: 310–314. (In Russ.)

6. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevda-kha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; Vol. 5. No. 1: 19–25.

7. Fedorenko I. Ya., Gnezdilov A. A. Dinamicheskie svoystva dvukhmassnoi vibratsionnoi tekhnologicheskoi mashiny [Dynamic properties of a two-mass vibrating technological machine]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; no 3: 179–183. (In Russ.)

8. Zedgenizov V. G., Fayzov S. Kh. Issledovanie vliyaniya osnovnykh parametrov dvukhmassovoi kolebatel'noi sistemy na ee dinamicheskie kharakteristiki [Investigation of the influence of the main parameters of a two-mass oscillatory system on its dynamic characteristics]. *iPolytech Journal*. 2022; Vol. 26, no 2: 164–172. (In Russ.)

9. Zhakash A., Talasbaev A.A., Raymova A. Self synchronization of two one massin resonant vibrators. *Theoretical & Applied Science*. 2015; Vol. 26. Iss. 6: 48–51.

10. Astashev V. K. O novykh napravleniyakh ispol'zovaniya yavleniya rezonansa v mashinakh [On new directions of using the phenomenon of resonance in machines]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2011; no 8(48): 10–15. (In Russ.)

11. Ben'kovich E. S. Prakticheskoe modelirovanie dinamicheskikh system [Practical modeling of dynamic systems]. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2002: 464. (In Russ.)

12. Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in Matlab, Sim Power Systems and Simulink]. Moscow: DMC Press Publ., 2008: 290. (In Russ.)

13. Garanin A. Yu., Silaeva E. V., Shlegel' O. A., Popenko V. N. DC electromagnet traction force calculation. *Elektrotekhnika* [Russian Electrical Engineering]. 2003; 2: 55–58. (In Russ.)

14. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous motions near critical speeds in a single-plane autobalancing device. *Technische Mechanik*. 2004. Vol. 24: 25–36.

15. Lu Chung-Jen, Tien Meng-Hsuan. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012; Vol. 32: 251–268.

16. Artyunin A. I., Elisayev S. V. Effect of «crawling» and peculiarities of motion of a rotor with pendular selfbalancers. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; Vol. 373–375: 38–42.

17. Kartavyi A. N. Mekhanizm vzbuzhdeniya kolebaniy i zatraty moshchnosti debalansnymi vibro-vozbuditelyami [Mechanism of excitation of vibrations and power consumption by unbalanced vibration exciters]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics]. 2008; 9: 34–40. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Зедгенизов В. Г. Руководство темой исследования. Анализ состояния вопроса и существующих решений.

Файзов С. Х. Разработка конструкции и методики. Выполнение расчетов и чертежей. Оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Viktor G. Zedgenizov Research topic management. Analysis of the issue and current solutions.

Sorbon Kh. Faizov Development of design and methodology. Performing calculations and drawings. Article layout.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, SPIN-код: 9565-419.

Файзов Сорбон Хотамович – аспирант кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department, SPIN-код: 9565-419.

Sorbon Kh. Faizov – Postgraduate student of the of Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department.

Научная статья

УДК 622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-24-33>

EDN: PYQNVY



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ДЛЯ РЕМОНТА ТРУБОПРОВОДА

И. С. Кузнецов

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6524-4976>

АННОТАЦИЯ

Введение. При проведении капитального ремонта трубопровода для удаления грунта под трубой в настоящее время применяется шанцевый инструмент. Повысить скорость проведения ремонтных работ позволяет предложенная автором новая технология разработки грунта под трубопроводом, предусматривающая использование сменного фрезерного рабочего оборудования для гидравлического экскаватора. Целью статьи является теоретическое исследование процесса взаимодействия конструктивных элементов фрезерного оборудования с разрабатываемым грунтом.

Методы и материалы. На основе базовых положений теории взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом разработана математическая модель работы фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора. Она позволяет получить зависимости сил сопротивления, возникающих на резах рабочего оборудования, от его конструктивных параметров и физико-механических свойств грунта.

Результаты. По результатам анализа полученной зависимости крутящего момента от угла резания и угловой скорости вращения фрезерной головки установлено, что наибольшее влияние на крутящий момент, требуемый на преодоление сил сопротивления грунта и привода рабочего органа, оказывает угловая скорость вращения фрезерной головки. Минимальное значение крутящего момента в изучаемой области 50 Н·м наблюдается в точке, где угол резания грунта составляет 45°, а угловая скорость вращения фрезерной головки – 4 рад/сек. Максимальный крутящий момент 215 Н·м отмечен при величине угла резания 65° и скорости вращения фрезерной головки 10 рад/сек.

Заключение. По результатам проведенного теоретического исследования процесса резания грунта при помощи фрезерного рабочего оборудования экскаватора установлен крутящий момент гидромотора, необходимый для приведения во вращение фрезерной головки. Результаты проведенных теоретических исследований рекомендуется использовать для расчета конструктивных и режимных параметров при проектировании и создании экспериментального образца фрезерного рабочего оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ремонт трубопроводов, подземный трубопровод, экскаватор гидравлический, землеройная машина, разработка грунта

БЛАГОДАРНОСТИ: автор благодарит за поддержку научных исследований коллектив кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Кузнецов И. С. Определение крутящего момента фрезерного рабочего оборудования экскаватора для ремонта трубопровода // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1. С. 24–33. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-24-33>

© Кузнецов И. С., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-24-33>
DOI: PYQNVY

DETERMINATION OF TORQUE FOR MILLING WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR WHEN REPAIRING A PIPELINE

Ilya S. Kuznetsov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6524-4976>

ABSTRACT

Introduction. During the overhaul of the pipeline to remove the soil under the pipe, a trench tool is currently used. The new technology of excavation of soil under the pipeline proposed by the authors, which provides for the use of replaceable milling working equipment for a hydraulic excavator, makes it possible to increase the speed of repair work. The purpose of the article is a theoretical study of the process of interaction between the structural elements of milling equipment and the developed soil.

Methods and materials. Based on the basic provisions of the theory of interaction of the working bodies of earth-moving machines with the soil, a mathematical model of the work of the milling working equipment of a hydraulic excavator was created. It makes possible to get the dependence of the resistance forces arising on the cutters of the working equipment, on its design parameters and the physical and mechanical properties of the soil.

Results. According to the results of the analysis of the obtained dependence of the torque on the cutting angle and the angular speed of rotation of the milling head, it was found that the greatest influence on the torque required to overcome the forces of soil resistance and the drive of the working body is exerted by the angular speed of rotation of the milling head. The minimum value of the torque in the study area 50 N·m is observed at the point where the cutting angle of the soil is 45°, and the angular speed of rotation of the milling head is 4 rad/sec. The maximum torque 215 N·m was recorded at a cutting angle of 65° and a milling head speed of 10 rad/sec.

Conclusions. According to the results of the theoretical study of the process of cutting soil with the help of the milling working equipment of the excavator, the torque of the hydraulic motor necessary to rotate the milling head was established. The results of the theoretical studies carried out are recommended to be used to calculate the design and operating parameters in the design and creation of an experimental sample of milling working equipment.

KEYWORDS: pipeline repair, underground pipeline, hydraulic excavator, earthmoving machine, excavation

GRATITUDES: the author thanks for the support of scientific research the team of the department "Operation of oil and gas and construction equipment" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SibADI», as well as the reviewers of the article.

The article was submitted 08.12.2022; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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. Kuznetsov Ilya S. Determination of torque for milling working equipment of excavator when repairing a pipeline. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 24-33. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-24-33>

© Kuznetsov I. S., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Россия имеет протяженную и развитую сеть газо- и нефтепроводов, эксплуатация которых осуществляется на территориях, характеризующихся различным природно-ресурсным потенциалом. Безопасность, эффективность и надежность объектов магистральных трубопроводов обеспечивается комплексом мер, в том числе поддержанием в исправном состоянии путем своевременного выполнения технического обслуживания и ремонта, своевременной реконструкции морально устаревшего или изношенного оборудования. Реализация указанных мер требует значительных капитальных вложений и трудовых затрат^{1,2} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Необходимо стремиться к высокой степени механизации технологических процессов и совершенствованию рабочего оборудования машин, используемых для сервисных работ при эксплуатации трубопроводов^{3,4,5,6} [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

При проведении капитального ремонта трубопровода для удаления грунта, расположенного непосредственно под трубой, применяют шанцевый инструмент. Однако данная технология не позволяет обеспечить высокий уровень безопасности выполнения земляных работ, увеличивает их трудоемкость и продолжительность. С той же целью используют роторные подкапывающие машины, которые перемещаются непосредственно по трубе. Однако во время проведения работ на трубопровод оказывается воздействие силовыми захватами. Кроме того, рабочему органу требуется внешнее питание от генератора, который в свою очередь необходимо перемещать вместе с машиной для подкопа. Существует решение, предусматривающее установку пробойника, закрепленного на задней стенке ковша экскаватора и позволяющего выполнять прокол грунта под трубопроводом. Недостатком такой конструкции является малая эффективность при работе с большими диаметрами труб и мерзлыми грунтами. Еще одно техническое решение – оборудование в

виде цепного рабочего органа, установленного на экскаватор. Однако эффективность цепного экскаватора существенно снижается при эксплуатации в условиях грунтов с высокой влажностью. Известна машина, особенностью которой является одновременное удаление грунта из боковых приямков траншеи при помощи цепного рабочего органа и под трубопроводом. Однако массогабаритные характеристики данной машины не позволяют эксплуатировать ее в местности с мягкими грунтами и при значительном поперечном уклоне.

Для решения научно-практической проблемы повышения эффективности ремонтных работ и совершенствования используемого в процессе их выполнения технологического инструментария автором предложено техническое решение – сменное фрезерное рабочее оборудование для гидравлического экскаватора. Его применение позволит повысить скорость проведения ремонтных работ благодаря реализации новой технологии разработки грунта под трубопроводом. Целью представленного в настоящей статье исследования является создание математической модели процесса взаимодействия конструктивных элементов разработанного фрезерного оборудования гидравлического экскаватора с грунтом.

Фрезерное рабочее оборудование для подкопа трубопровода, установленное на базовую машину – экскаватор, представлено в виде схемы на рисунке 1. Им заменяется ковш экскаватора после откапывания трубопровода сверху и с обеих сторон. Перед началом разработки грунта под трубой стрела 1 и рукоять 3 экскаватора располагаются перпендикулярно трубопроводу. Шток гидроцилиндра управления оборудованием 4 максимально выдвинут, рабочий орган опущен. Далее рабочее оборудование опускают в приямок траншеи. Движением штока гидроцилиндра 4 вверх происходит поворот телескопического цилиндра 8 и рабочего оборудования на угол 90° к грунту под трубопроводом.

¹ Халлыев Н. Х. Современные методы ремонта трубопроводов / Н. Х. Халлыев [и др.]. М.: ИРЦ Газпром, 1997. 42 с.

² Решетников А. Д. Технологические процессы строительства и капитального ремонта магистральных газопроводов в сложных природно-климатических условиях. М.: СИП РИА, 2004. 320 с.

³ Технология сооружения газонефтепроводов / Ф. М. Мустафин [и др.]. Т. 1. Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.

⁴ Аникин Е. А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. М.: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.

⁵ Организация строительства магистральных трубопроводов / Ю. П. Баталин [и др.]. М.: Недра, 1980. 344 с.

⁶ Ремонт локальных участков трубопровода / В. Г. Халлыев [и др.]. М.: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

Поступательное движение фрезерной головки 10 для разработки и удаления грунта из-под трубопровода обеспечивается выдвижением телескопического цилиндра 8. Установленные на фрезерной головке 10 резцы 11 осуществляют эффективное разрушение раз-

рабатываемого грунта, а шнек 12 – его удаление из зоны разработки.

Для лучшего понимания расположения резцов на рисунке 2 представлен общий вид фрезерного рабочего оборудования.

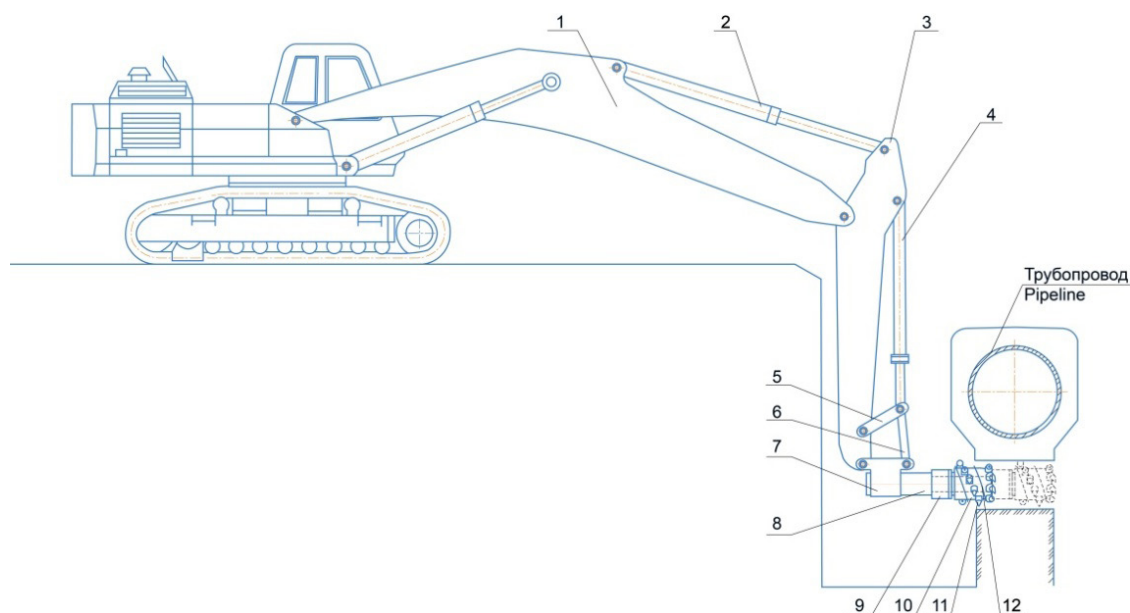


Рисунок 1 – Экскаватор со сменным фрезерным оборудованием:

1 – стрела; 2 – гидроцилиндр управления рукоятью; 3 – рукоять;

4 – гидроцилиндр управления оборудованием;

5 и 6 – рычаги, соединенные с гидроцилиндром управления;

7 – кронштейн; 8 – телескопический цилиндр; 9 – гидравлический привод;

10 – фрезерная головка; 11 – резцы; 12 – шнек

Источник: составлено автором.

Figure 1 –Excavator with replaceable milling equipment

1 – boom; 2 – stick hydraulic cylinder; 3 – stick; 4 – bucket hydraulic cylinder;

5 и 6 – linkage connected to the control hydraulic cylinder; 7 – bracket;

8 – telescopic cylinder; 9 – hydraulic drive; 10 – milling head; 11 – cutter; 12 – screw

Source: compiled by the author.

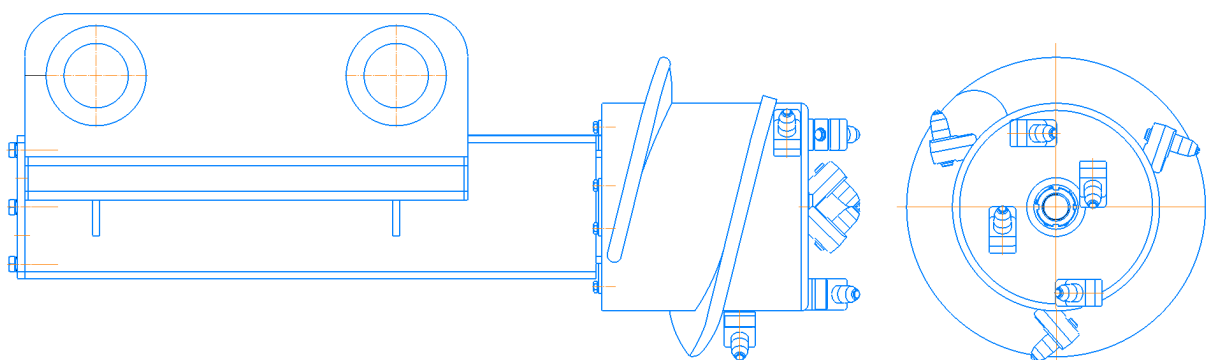


Рисунок 2 – Общий вид фрезерного рабочего оборудования

Источник: составлено автором.

Figure 2 – General view of the milling working equipment

Source: compiled by the author.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На основе базовых положений теории взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом создана математическая модель работы фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора. Она позволяет получить зависимости сил сопротивления, возникающих на резцах рабочего оборудования, от его конструктивных параметров и физико-механических свойств грунта.

Резец рабочего оборудования состоит из наконечника, корпуса и цилиндрической зажимной гильзы. Наконечник представляет собой усеченный конус. Силы сопротивления на резцах возникают как от вращательного, так и от поступательного движения рабочего органа. Однако, основываясь на принципе независимости действия сил, определять их значения возможно, рассматривая вращательное и поступательное движение отдельно.

Расчетная схема для исследования взаимодействия наконечника резца с грунтом представлена на рисунке 3. Расчетная схема строится следующим образом:

1. Строим окружность, по которой движется наконечник резца, радиусом $OK = R_T$, где R_T – радиус отверстия после прохода фрезерной головки.
2. Проводим перпендикуляр, касательный к окружности в точке К.
3. Под углом резания α_p к касательной проводим осевую линию конуса и строим контур конуса, $LK = a$, где a – расстояние переднего основания конуса от точки К.
4. С началом в точке L строим систему координат x, y, z , неподвижно связанную с конусом.
5. Из центра окружности O проводим перпендикуляр OM к осевой линии конуса.

Рассмотрим произвольную точку на поверхности наконечника с координатами x, y, z .

Зависимость для расчета вектора скорости движения произвольной точки определяется выражением⁷:

$$\vec{v} = (MK - LK - z)\omega\vec{i} - (OM - x)\omega\vec{k}, \quad (1)$$

где $\vec{i}, \vec{k}$ – единичные векторы.

Учитывая, что

$$MK = R_T \sin \alpha_p, \quad OM = R_T \cos \alpha_p,$$

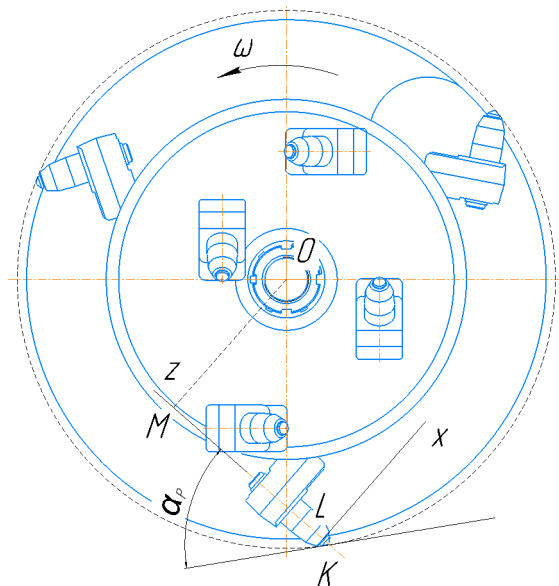


Рисунок 3 – Расчетная схема для исследования взаимодействия наконечника резца с грунтом:
 М – точка, через которую проходит перпендикуляр, проведенный через ось вращения, к оси z;
 К – точка, через которую проходит перпендикуляр от оси вращения к касательной;
 L – точка пересечения осей x и z;
 ось y не обозначена, направлена перпендикулярно осям x и z;
 O – ось вращения фрезерной головки;
 ω – угловая скорость вращения фрезерной головки;
 α_p – угол резания
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Calculation scheme for studying the interaction of the tip of the cutter with the soil
 M – the point through which the perpendicular drawn through the axis of rotation passes to the z-axis;
 K – point through which the perpendicular passes from the axis of rotation to the tangent;
 L – point of intersection of the x and z axes;
 the y-axis is not marked, it is directed perpendicular to the x and z axes;
 O – axis of rotation of the milling head;
 ω – angular speed of rotation of the milling head;
 α_p – cutting angle
 Source: compiled by the author.

где R_T – радиус отверстия после прохода фрезерной головки, положим $LK = a$. Тогда из выражения (1) следует

$$\vec{v} = (R_T \sin \alpha_p - a - z)\omega\vec{i} - (R_T \cos \alpha_p - x)\omega\vec{k}.$$

Единичный вектор нормали в произвольной точке усеченного конуса определяется зависимостью

⁷ Ионов В.Н., Огибалов П. М. Прочность пространственных элементов конструкций. М.: Высшая школа, 1980. 440 с.

$$\vec{n} = \frac{x \cos \alpha}{r + z \operatorname{tg} \alpha} \vec{i} + \frac{y \cos \alpha}{r + z \operatorname{tg} \alpha} \vec{j} - \sin \alpha \vec{k},$$

где r – радиус верхней части наконечника резца; $\vec{j}$ – единичный вектор; α – угол наклона нормали к соответствующей оси.

Находим скалярное произведение векторов $\vec{\vartheta}$ и $\vec{n}$:

$$\vec{\vartheta} \cdot \vec{n} = \frac{x \cos \alpha}{r + z \operatorname{tg} \alpha} (R_T \sin \alpha_p - a - z) \omega + (R_T \cos \alpha_p - x) \omega \sin \alpha = \vartheta \cos(\vec{\vartheta} \wedge \vec{n}). \quad (2)$$

Переходим к полярной системе координат, имея в виду, что

$$x = \rho \cdot \cos \varphi; \quad r + z \cdot \operatorname{tg} \alpha = \rho; \quad z = (\rho - r) \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (3)$$

где ρ – полярный радиус; φ – полярный угол.

С учетом соотношений (3) выражение (2) принимает вид

$$\vartheta \cos(\vec{\vartheta} \wedge \vec{n}) = \omega \cdot [(R_T \sin \alpha_p - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) \cos \varphi \cos \alpha + (R_T \cos \alpha_p - \rho \cos \varphi) \sin \alpha]. \quad (4)$$

Нормальное давление в произвольной точке боковой поверхности наконечника составит

$$P = \frac{\gamma_0}{1 - b_1} [\vartheta \cdot \cos(\vec{\vartheta} \wedge \vec{n})]^2,$$

где γ_0 – плотность грунта; b_1 – сжимаемость грунта.

С учетом выражения (4) находим [18]:

$$P = \frac{\gamma_0 \cdot \omega^2}{1 - b_1} [(R_T \sin \alpha_p - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) \cos \varphi \cos \alpha + (R_T \cos \alpha_p - \rho \cos \varphi) \sin \alpha]^2. \quad (5)$$

Элементарное нормальное усилие на поверхности усеченного конуса найдем из выражения

$$dN = \frac{P dS}{\sin \alpha} = \frac{P \rho d\rho d\varphi}{\sin \alpha},$$

где S – площадь взаимодействия грунта с наконечником резца.

Или в векторной форме

$$\vec{dN} = dN_x \vec{i} + dN_y \vec{j} + dN_z \vec{k},$$

где

$$dN_x = dN \cdot n_x = dN \cos \varphi \cdot \cos \alpha; \quad (6)$$

$$dN_y = dN \cdot n_y = dN \sin \varphi \cdot \cos \alpha; \quad (7)$$

$$dN_z = dN \cdot n_z = dN \sin \alpha, \quad (8)$$

где n_x, n_y, n_z – проекции единичного вектора $\vec{n}$.

Элементарный момент от сил нормального давления:

$$\begin{aligned} dM_\sigma &= dN_x \cdot (MK - LK - z) + dN_z \cdot (OM - x) = \\ &= dN_x \cdot (R_T \sin \alpha - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) + dN_z \cdot (R_T \cos \alpha - \rho \cos \varphi). \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом выражений (6), (7), (8) из зависимости (9) следует:

$$dM_\sigma = dN \cdot [\cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot (R_T \sin \alpha - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) + \sin \alpha \cdot (R_T \cos \alpha - \rho \cos \varphi)].$$

Суммарный момент от сил нормального давления на наконечник резца определяется из двойного интеграла

$$M_\sigma = \int_r^R \int_0^\pi \frac{\rho \, d\rho \, d\varphi}{\sin \alpha} [\cos \varphi \cos \alpha (R_T \sin \alpha - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) + \sin \alpha (R_T \cos \alpha - \rho \cos \varphi)]. \quad (10)$$

Двойной интеграл вычисляется в области полукольца, ограниченного радиусами R и r . Исходя из этого, в формуле (10) устанавливаются соответствующие пределы интегрирования. Определим момент, возникающий на поверхности наконечника резца от сил трения о грунт. Элементарная сила трения на поверхности усеченного конуса в векторной форме находится из выражения

$$\vec{dT} = \frac{\rho \, ds}{\sin \alpha} \cdot \mu_0 \cdot \vec{\tau} = dT_x \vec{i} + dT_y \vec{j} + dT_z \vec{k},$$

где μ_0 – коэффициент трения; $\vec{\tau}$ – вектор единичной силы трения;

$$\vec{\tau} = \cos \varphi \sin \alpha \cdot \vec{i} + \sin \varphi \sin \alpha \cdot \vec{j} + \cos \alpha \cdot \vec{k};$$

$$dT_x = dT \cos \varphi \sin \alpha;$$

$$dT_y = dT \sin \varphi \sin \alpha;$$

$$dT_z = dT \cos \alpha,$$

где dT – элементарная сила трения.

Элементарный момент от сил трения на боковой поверхности усеченного конуса определяется как

$$\begin{aligned} dM_T &= dT_x \cdot (R_T \sin \alpha - a - z) + dT_z \cdot (R_T \cos \alpha - x) = \\ &= dT [\cos \varphi \cdot \sin \alpha (R_T \sin \alpha - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha) + \\ &\quad + \cos \alpha (R_T \cos \alpha - \rho \cos \varphi)] \end{aligned}$$

Исходя из установленных зависимостей, получим суммарный момент от сил трения

$$M_T = \int_r^R \int_0^\pi \frac{\rho \, d\rho \, d\varphi}{\sin \alpha} \cdot \mu_0 \cdot [\cos \alpha (R_T \cos \alpha - \rho \cos \varphi) + \cos \varphi \sin \alpha (R_T \sin \alpha - a - (\rho - r) \operatorname{ctg} \alpha)]. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения двойных интегралов (10) и (11) были разработаны программы с использованием языка программирования Matlab. Для построения зависимости в графическом виде приняты следующие значения. Полярный угол φ ($0 - \pi$ рад.). Угол резания α (45–65 град.) основан на характеристиках существующих аналогов фрезерного рабочего оборудования. Полярный радиус ρ составляет 0,015 м; P – нормальное давление, 200000 Н/м²; μ_o – коэффициент трения, 0.3; R_r = радиус отверстия после прохода фрезерной головки, 0,4 м; a – радиус резца, 0,015 м; r – радиус верхней части наконечника резца = 0,01 м. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 4.

Из анализа полученной зависимости суммарного крутящего момента резцов от угла

резания и угловой скорости следует, что наибольшее влияние на крутящий момент, требуемый для преодоления сил сопротивления грунта и обеспечения привода рабочего органа, оказывает угловая скорость вращения фрезерной головки. Угол резания грунта имеет меньшее значение. Минимальное значение крутящего момента при заданных параметрах 50 Н·м наблюдается в точке, где угол резания грунта составляет 45°, а угловая скорость вращения фрезерной головки – 4 рад/сек. Максимальный крутящий момент 215 Н·м отмечен при величине угла резания 65° и скорости вращения фрезерной головки 10 рад/сек. При недостаточном крутящем моменте рабочий орган не обеспечит разрушение грунта, рабочее оборудование будет пробуксовывать или застопорится.

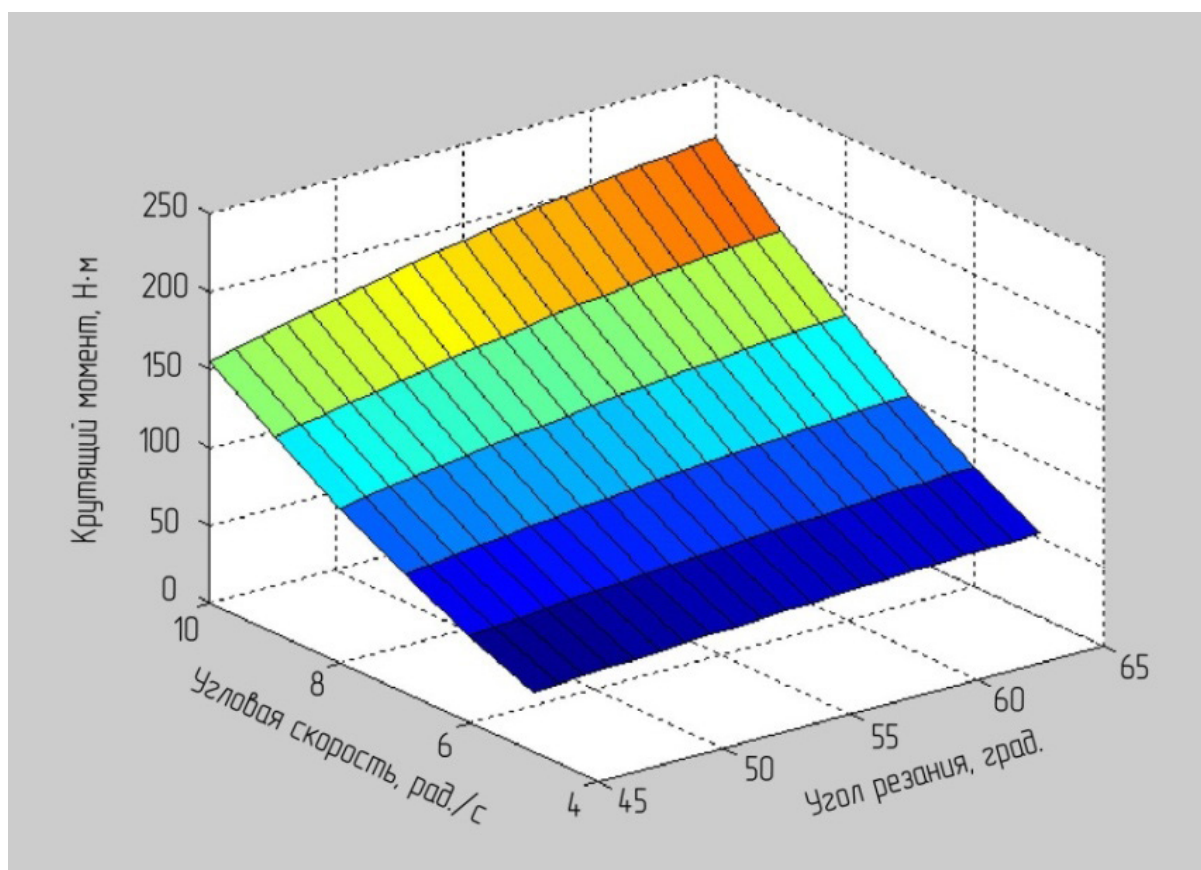


Рисунок 4 – Зависимость суммарного крутящего момента резцов от угла резания и угловой скорости
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of the total torque of the cutters on the cutting angle and angular velocity
Source: compiled by the author.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование фрезерного рабочего оборудования одноковшового экскаватора обеспечит механизацию процесса подкопа трубопровода. По результатам проведенного теоретического исследования процесса резания грунта при помощи фрезерного рабочего оборудования экскаватора установлен крутящий момент гидромотора, необходимый для приведения во вращение фрезерной головки. Разработанное программное обеспечение позволит автоматизировать процесс расчета конструктивных параметров фрезерного рабочего оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. 2020. Issue 2. P. 213–223.
2. Зорин Е. Е., Толстов А. Э., Ефимов В. М. Напряженно-деформированное состояние трубопроводов подземной прокладки в условиях криолитозоны // *Нефть, газ и бизнес*. 2015. № 9. С. 9–12.
3. Набиев Р. Р. Обеспечение надежности длительно эксплуатируемых нефтепроводов // *Трубопроводный транспорт нефти*. 2010. № 12. С. 9–11.
4. Шарыгин Ю. М., Романцов С. В., Шарыгин А. М. Повышение прочности дефектных труб, усиленных композитными муфтами с болтовым соединением // *Транспорт и подземное хранение газа*. 2002. № 3. С. 104–107.
5. Лукьянов В. Ф., Лукьянов А. А. Ремонт магистральных трубопроводов стальными сварными муфтами // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2016; 16(3):39–45. <https://doi.org/10.12737/20224>
6. Непроектные положения газопроводов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов / А. М. Большаков [и др.] // *Газовая промышленность*. 2014. № 4. С. 66–69.
7. Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // *Современные наукоемкие технологии*. 2011. № 4. С. 64–67.
8. Черняев К. В. Мониторинг технического состояния нефтепроводов // *Трубопроводный транспорт нефти*. 2000. № 9. С. 14–17.
9. Моделирование динамики регулируемого гидромотора / Р. Т. Емельянов [и др.] // *Вестник КрасГАУ*. 2014. № 8. С. 181–185.
10. Мухаммедова Д. Ч. Современные технические и технологические решения по повышению эффективности ремонта газопроводов // *Молодой ученый*. 2011. Т. 1, № 5-1. С. 86–88.
11. Пенчук В. А. Закономерности разрушения грунта рабочими органами машин для земляных работ // *Известия ВУЗов. Строительство*. 1999. № 1. С. 97–102.

12. Тиратсу Д. О выводе из эксплуатации объектов добычи и транспорта нефти: опыт Великобритании // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2017. № 1. С. 82–83.
13. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33. No. 5. 1423–1438.
14. Archibald I. C. Soil stabilizer // *Pipeline and Gas Journal*. 1984. No. 11. P. 44–46.
15. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of assessing integrity of pipeline systems with different types of defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016. Vol. 30. P. 9–43.
16. Mourad N., Rabia K. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015; 40(11):3273–3283.
17. Кузнецов И. С. Теоретические исследования процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т. 18. № 1(77). С. 42–50. DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50.
18. Завьялов А. М., Завьялов М. А., Кузнецова В. Н. Взаимодействие дорожных и строительных машин с контактной средой. Омск: Полиграфический центр КАН, 2011. 370 с.

REFERENCES

1. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems. *Frontiers in Energy*. 2020; Issue 2: 213–223.
2. Zorin E. E., Tolstov A. E., Yefimov V.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye truboprovodov podzemnoy prokladki v usloviyakh kriolitozony [Stress-strain state of underground pipelines in permafrost]. *Neft', gaz i biznes*. 2015; 9: 9–12. (In Russ.)
3. Nabiye R. R. Romantsov S. V., Sharygin A. M. Obespecheniye nadezhnosti dlitel'no ekspluatiruyemykh nefteprovodov [Ensuring the reliability of long-term oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nef-ti*. 2010; 12: 9–11. (In Russ.)
4. Sharygin YU. M., Povyseniye prochnosti defektnykh trub, usilennykh kompozitnymi muftami s boltovym soyedineniyem [Improving the Strength of Defective Pipes Reinforced with Bolted Composite Couplings]. *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*. 2002; 3: 104–107. (In Russ.)
5. Lukyanov V.F., Lukyanov A.A. Remont magistral'nykh truboprovodov stal'nymi svarnymi muftami [Main pipeline repair by steel welding sockets]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016; 16(3):39–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/20224>
6. Bol'shakov A.M. Neproyektnyye polozheniya gazoprovodov, prolozhennykh podzemnym sposobom v rayonakh mnogoletnemerzlykh gruntov [Non-design provisions of gas pipelines laid underground in areas of permafrost soils]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2014; 4: 66–69. (In Russ.)

7. Bulavintseva A. D., Mazurkin P.M. Dinamika avariya po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft» [Dynamics of accidents due to damage on the linear part of the main oil pipelines of OAO AK Transneft]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2011; 4: 64–67. (In Russ.)
8. Chernyayev K. V. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nefteprovodov [Monitoring of the technical condition of oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2000; 9: 14–17. (In Russ.)
9. Yemel'yanov R.T. Modelirovaniye dinamiki reguliruyemogo gidromotora [Modeling the Dynamics of a Variable Hydraulic Motor]. *Vestnik KrasGAU*. 2014; 8: 181–185. (In Russ.)
10. Mukhammedova D.CH. Sovremennyye tekhnicheskiye i tekhnologicheskyye resheniya po povysheniyu effektivnosti remonta gazoprovodov [Modern technical and technological solutions to improve the efficiency of gas pipeline repair]. *Molodoy uchenyy*. 2011. T. 1. № 5-1: 86–88. (In Russ.)
11. Penchuk V. A. Zakonomernosti razrusheniya grunta rabochimi organami mashin dlya zemlyanykh rabot [Patterns of soil destruction by the working bodies of machines for earthworks]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 1999; 1:97–102. (In Russ.)
12. Tiratsu D. O vyvode iz ekspluatatsii ob'yektov dobychi i transporta nefti: opyt Velikobritanii [On the decommissioning of oil production and transportation facilities: UK experience]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*. 2017; 1: 82–83. (In Russ.)
13. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws. *Engineering Structures*. 2011; Vol. 33. No. 5: 1423–1438.
14. Archibald I. C. Soil stabilizer. *Pipeline and Gas Journal*. 1984; No. 11: 44–46.
15. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of assessing integrity of pipeline systems with different types of defects. *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016; Vol. 30: 9–43.
16. Mourad N., Rabia K. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015;40(11):3273–3283.
17. Kuznetsov I.S. Theoretical study of interaction process of cutter for milling working equipment of excavator with soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):42-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50>
18. Zav'yalov A. M., Zav'yalov M. A., Kuznetsova V. N. Vzaimodeystviye dorozhnykh i stroitel'nykh mashin s kontaktной sredoy [Interaction of road and construction machines with a contact medium]. Omsk: Poligraficheskiy tsentr KAN, 2011: 370. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», SPIN-код: 6890-3069.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ilya S. Kuznetsov (Omsk, Russia) – teacher, Oil and Gas and Construction Equipment Operation Department, SPIN-код: 6890-3069.

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

EDN: DJBHGB



ДВИЖУЩЕЕ УСИЛИЕ ДВИГАТЕЛЯ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Н. Назаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

alexnazavr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

АННОТАЦИЯ

Введение. Выявлена потребность в моделировании динамических процессов механизма подъема в реальных условиях эксплуатации. Определена необходимость повышения точности описания движущего усилия двигателя для наиболее распространенных типов управления приводом кранового механизма подъема.

Материалы и методы. Рассмотрена работа односкоростного электродвигателя с короткозамкнутым ротором без управления скоростью, с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной обмотке и с короткозамкнутым ротором и управлением от преобразователя частоты. В качестве исходной зависимости принята статическая механическая характеристика электродвигателя. Для учета движущего усилия двигателя при частотной системе управления и при релейно-контакторной и электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи использовалась формула Клосса с соответствующими значениями параметров: синхронной скорости, критического усилия и критического скольжения.

Результаты. Представлены зависимости для движущего усилия двигателя, описывающие работу механизма с наиболее распространенными способами управления скоростью привода кранового механизма подъема. В случае частотной системы управления приведена форма записи движущего усилия двигателя в случае установившегося движения и в случае переходных процессов пуска / торможения, при реализации соответствующих алгоритмов преобразователем частоты. Приведены экспериментальные и теоретические графики процессов подъема груза для случаев подъема с подхватом при релейно-контакторной системе управления и с упругим подхватом при частотной системе управления.

Выводы. Сделан вывод о применимости статической механической характеристики для описания работы электродвигателя в крановых приводах. Представленные зависимости обеспечивают возможность моделировать полный рабочий цикл механизма подъема. Зависимости справедливы как во время установившегося движения механизма, так и во время переходных процессов. Сделан вывод об использовании динамической модели, учитывающей представленную форму движущего усилия двигателя, в практических целях для анализа работы крана с учетом влияния ограничителя грузоподъемности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механизм подъема, нагрузка на механизм, динамическая модель крана, кран мостового типа, движущее усилие двигателя, способы управления приводом, частотная система управления, релейно-контакторная система управления

БЛАГОДАРНОСТЬ: автор статьи выражает свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

Статья поступила в редакцию 04.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 20.02.2023.

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: Назаров А. Н. Движущее усилие двигателя механизма подъема кранов мостового типа в реальных условиях эксплуатации // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 34-50. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

© Назаров А. Н., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>
EDN: DJBHGB

MOTOR DRIVING FORCE OF BRIDGE-TYPE CRANE LIFTING MECHANISM UNDER REAL OPERATING USE

Aleksandr N. Nazarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
alexnazavr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

ABSTRACT

Introduction. The requirement for modelling the dynamic processes of a hoisting mechanism in real operating situations has been revealed. The necessity of increasing the accuracy of moving effort description for the most common types of crane hoist drive control has been determined.

Materials and Methods. The operation of a single-speed electric motor with squirrel-cage rotor without speed control, with a phase rotor and additional resistors in the rotor winding and with a squirrel-cage rotor and control by a frequency converter has been considered. The static characteristic of the electric motor is taken as the initial function. The Clauss formula with the corresponding values of the parameters synchronous speed, critical force and critical slip was used to take into account the driving force of the motor for frequency control and for relay-contactor control and a motor with a phase-rotor and additional resistances in the rotor circuit.

Results. The dependences for the motor driving force with the most common methods of speed control of the crane hoisting mechanism drive are presented. In the case of the frequency control system, the form of the motor driving force is given in the case of steady-state motion and in the case of transient starting/braking processes when the corresponding algorithms are implemented by a frequency converter. Experimental and theoretical graphs of the load lifting processes for the cases of lifting with pickup in the relay-contactor control system and with elastic pickup in the frequency control system are given.

Conclusion. The conclusion about applicability of static mechanical characteristic for description of electric motor operation in crane drives is given. The presented dependences provide an opportunity to model the full working cycle of the hoisting mechanism. The dependences are valid both during steady motion of the mechanism and during transients. It is concluded about the use of the dynamic model taking into account the presented form of the motor driving force for practical purposes for the analysis of the crane operation with regard to the effect of the lifting capacity limiter.

KEYWORDS: hoisting mechanism, mechanism loading, dynamic model of crane, bridge-type crane, motor driving force, drive control methods, frequency control system, relay-contactor control system

ACKNOWLEDGEMENT. The author of the article express gratitude to the staff of the Lifting and Transport Systems Department of the Bauman Moscow State University for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

The article was submitted 4.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; accepted for publication 20.02.2023.

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. Aleksandr N. Nazarov Motor driving force of bridge-type crane lifting mechanism under real operating use *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 34-50. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

© Nazarov A. N., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Исследование выполняется в рамках решения задачи повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных машин. Потенциал к повышению безопасности автор видит в оценке характера работы кранов в реальных условиях эксплуатации [1, 2, 3].

Процесс эксплуатации сопровождается возникновением в элементах крана нагрузок¹, имеющих непостоянный, динамический характер [4, 5]. Соответственно для описания характера работы требуется построить динамическую модель, на основе которой можно было бы вычислить реальные нагрузки во всех допустимых в процессе эксплуатации положениях крана и способах управления им. Данная работа посвящена решению задачи для механизма подъема.

На основе анализа технологического процесса работы крана был выявлен перечень возможных особенностей эксплуатации, оказывающих влияние на динамические нагрузки, что позволило сформировать перечень этапов динамического процесса, полно описывающих любой рабочий цикл механизма подъема крана в реальных условиях эксплуатации. При этом каждый отдельный цикл работы может включать как все этапы, так и их часть.

Специфика существующих динамических моделей заключается в рассмотрении только наиболее опасных расчетных случаев, определенных по критерию возможности достижения в них наибольших динамических нагрузок² [6, 7, 8].

Следствием такого подхода явилось упрощенное рассмотрение и объединение ряда этапов. Этапы, на которых динамические нагрузки не могут превысить максимальные значения нагрузок других этапов, не рассматривались вовсе и математического описания не имели.

Кроме того, параметры моделей, изменяющиеся в процессе эксплуатации крана или даже непосредственно в процессе подъема³, учтены упрощенно [9, 10, 11].

Таким образом, существующие динамические модели описывают лишь часть реализуемых на практике расчетных случаев, а допущения, принятые при их описании, не позволяют получить решения требуемой точности при описании произвольного рабочего цикла механизма подъема.

Ранее авторами были введены новые расчетные случаи, не описанные в существующих динамических моделях: пауза до отрыва груза от основания, повторный пуск двигателя до отрыва груза от основания, остановка двигателя после отрыва груза от основания, повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания.

Способ учета движущего усилия двигателя⁴ в известных динамических моделях не позволил описать часть введенных расчетных случаев с требуемой точностью⁵, а часть вовсе [12, 13, 14].

В существующих моделях рассматриваются два случая начала подъема груза: подъем

¹ Петренко В. Исследование динамики мостового крана с использованием мультивариантных расчетов / В. Петренко, П. Жевжигов // Проблемы безопасности на транспорте: МАТЕРИАЛЫ XI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. В 2 частях, Гомель, 25–26 ноября 2021 года. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2021. С. 53–54. EDN UNOIKK.

² Корытов М. С. Исследование влияния массы груза на силы со стороны приводов мостового крана при движении в режиме гашения неуправляемых колебаний / М. С. Корытов, В. С. Щербаков, В. В. Титенко // Проблемы машиноведения: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Омск, 17–19 марта 2020 года / Научный редактор П. Д. Балакин. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 72–80. EDN MEMBWY.

³ Михальчик Н. Л. Определение динамических параметров крана для построения полуавтоматической системы настройки прибора-ограничителя грузоподъемности / Н. Л. Михальчик // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 04 апреля 2019 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 543–546. EDN UJMDRV.

⁴ Кабаев Д. М. Исследование динамических процессов крана при работе механизма подъема / Д. М. Кабаев, В. Е. Тюленев // Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции: в 2 ч., Ярославль, 21 апреля 2021 года. Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2021. С. 200–203. EDN LWIGFN.

⁵ Назаров А. Н. Экспериментальное и теоретическое определение частоты опроса датчика нагрузки для защиты механизма подъема крана от перегрузок / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 декабря 2021 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2021. С. 157–162. EDN EUIPWD.

с подхватом и подъем с веса. При этом форма записи движущего усилия двигателя в обоих случаях принята такой, чтобы приводить к наибольшим динамическим нагрузкам.

Условием подъема с подхватом является работа двигателя на установившейся ветви статической механической характеристики, соответствующей наибольшей скорости электродвигателя. По этой причине движущее усилие двигателя учитывается линейной зависимостью от текущей скорости двигателя.

При подъеме с веса в большинстве динамических моделей [7, 10, 11, 12, 14] движущее усилие двигателя на неустановившейся части механической характеристики принимается равным среднепусковому усилию, что, с одной стороны, позволяет сохранить возможность получения аналитического решения во время переходного процесса, но, с другой стороны, снижает точность описания динамических нагрузок и кинематических характеристик.

В динамической модели Н. А. Лобова [15] и моделях, построенных на ее основе, движущее усилие двигателя описывается согласно статической механической характеристике по формуле

$$P = \frac{a_1 - a_2 \dot{x}_1}{a_3 + \alpha(-a_4 \dot{x}_1 + \dot{x}_1^2)}, \quad (1)$$

где

$P [H]$ – движущее усилие двигателя;

$$a_1 \left[\frac{H \cdot M^2}{c^2} \right] = 2P_K \cdot s_K \cdot \dot{x}_c^2;$$

$P_K [H]$ – движущее усилие, соответствующее критическому скольжению;

s_K – критическое скольжение;

$\dot{x}_c \left[\frac{M}{c} \right]$ – синхронная скорость;

$$a_2 [H] = a_1 / \dot{x}_c;$$

$\dot{x}_1 \left[\frac{M}{c} \right]$ – текущая скорость электродвигателя;

$$a_3 \left[\frac{M^2}{c^2} \right] = s_K^2 \dot{x}_c^2 + \dot{x}_c^2;$$

$$a_4 \left[\frac{M}{c} \right] = 2\dot{x}_c;$$

α – коэффициент, указывающий часть механической характеристики, на которой работает электродвигатель; $\alpha = 0$ для работы на линейной части установившейся ветви механической характеристики; $\alpha = 1$ для работы на любой ветви механической характеристики.

Для формы учета движущего усилия двигателя по формуле (1) не обоснована приме-

нимость в крановом приводе с точки зрения влияния переходных электрических процессов, возникающих при подключении электродвигателя к сети.

Направленность существующих моделей на вычисление максимальных нагрузок также обусловила отсутствие возможности получения решений для случаев, когда привод оснащен системами управления скоростью.

По той же причине в динамических моделях не описана форма представления движущего усилия двигателя при торможении, что характерно для приводов с частотной системой управления.

Целью исследования является разработка формы учета движущего усилия двигателя кранового механизма подъема, оснащенного наиболее распространенными системами управления.

Задача исследования: разработать зависимости, описывающие работу электродвигателя механизма подъема, соответствующего:

- релейно-контакторной системе управления и односкоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором;
- релейно-контакторной системе управления и п-скоростным асинхронным электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи;
- частотной системе управления и односкоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходной зависимости для описания движущего усилия двигателя принята формула Клосса [15] для случая работы электродвигателя на любой ветви механической характеристики (рисунок 1), в следующем виде

$$P_{\alpha=1} = 2 \cdot P_K \cdot s_K \cdot \dot{x}_c \cdot \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c - \dot{x}_1)^2 + s_K^2 \cdot \dot{x}_c}, \quad (2)$$

где

$P_{\alpha=1} [H]$ – движущее усилие двигателя, описывающее работу привода с релейно-контакторной схемой управления и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

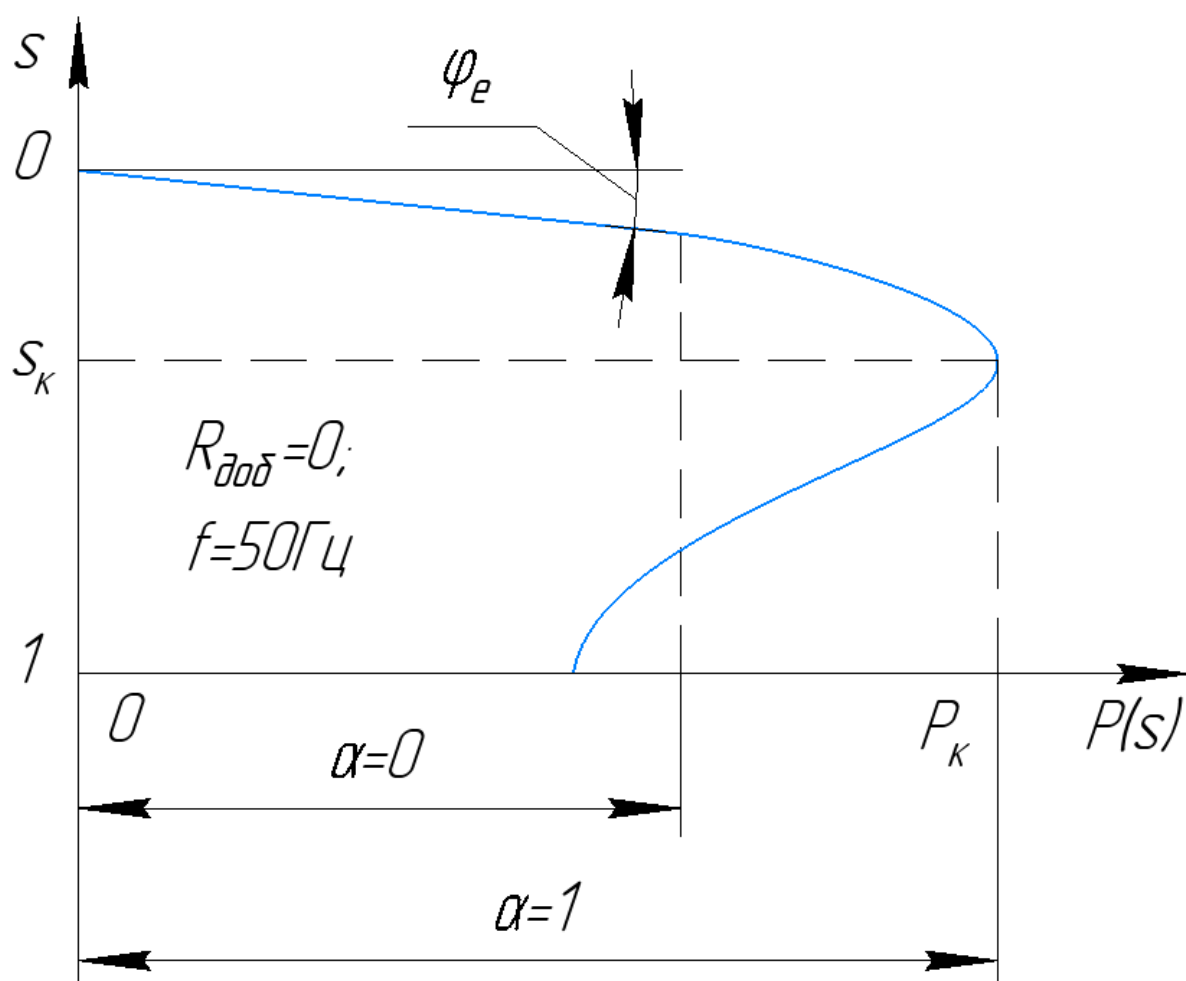


Рисунок 1 – Движущее усилие двигателя, описывающее работу привода с релейно-контакторной схемой управления и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором:
 s – скольжение; s_k – критическое скольжение;
 φ_e – угол наклона линейной ветви естественной механической характеристики;
 $P(s)$ – движущее усилие двигателя; $R_{доб}$ – величина добавочного сопротивления;
 $\alpha=0$ – область работы на линейной части установившейся ветви механической характеристики;
 $\alpha=1$ – область работы на любой ветви механической характеристики
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Motor driving force describing the operation of a drive with a relay-contactor control system and a single-speed electric motor with squirrel-cage rotor.
 s – slip; s_k – critical slip; φ_e – angle of the linear part of the main mechanical characteristic,
 $P(s)$ – motor drive force; $R_{доб}$ – additional resistor value;
 $\alpha=0$ – operation area on the linear part of the steady-state mechanical characteristic;
 $\alpha=1$ operation area on any part of the mechanical characteristic.
 Source: compiled by the author.

Преимуществом такого способа учета данного параметра динамической модели является удобство практического применения. Это обусловлено тем, что составляющие формулы

– синхронная скорость, критическое усилие и критическое скольжение – возможно определить, зная лишь паспортные характеристики электродвигателя.

Однако реализация такого способа учета движущего усилия двигателя требует принять допущение, что переходные электрические процессы не оказывают значимого влияния на описываемую величину. Формула Клосса является способом представления статической механической характеристики, следовательно, переходные электрические процессы в ней не учитываются.

Важно оценить влияние переходных электрических процессов при пуске электродвигателя для рассматриваемых систем управления.

При включении электродвигателя в сеть в статорных обмотках возникает ток, имеющий две составляющие: принужденную синусоидальную [16] с частотой сети и свободную апериодическую [17, 18]. Аналогичные две составляющие возникают в обмотках ротора.

Взаимодействие токов и магнитных потоков статора и ротора приводит к образованию электромагнитных моментов. Один момент, вызванный принужденными составляющими токов и магнитных потоков, соответствует статической механической характеристике асинхронного двигателя в установившемся режиме. Другой момент носит колебательный знакопеременный характер и суммируется с электромагнитным моментом от принужденной составляющей токов.

По мере разгона двигателя свободные составляющие токов и вызванные ими переменные составляющие момента затухают и по достижении при разгоне двигателя критического скольжения практически исчезают.

Таким образом, переходные электрические процессы при прямом пуске электродвигателя оказывают значительное влияние на результирующий электромагнитный момент, делая недопустимым описание процесса на основании статической механической характеристики, то есть формулы (2).

Однако механизмы грузоподъемных машин оснащаются специально разработанными под их условия работы крановыми электродвигателями [19, 20]. Они отличаются повышенным критическим и пусковым моментами и относительно электродвигателей общепромышленной серии большим сопротивлением ротора. Повышенное сопротивление ротора способствует уменьшению амплитуды колебаний электромагнитного момента при пуске и более быстрому затуханию колебательной составляющей.

При пуске механизма, оснащенного двигателем с фазным ротором, в обмотки ротора

включены дополнительные сопротивления, благодаря которым колебательная составляющая электромагнитного момента затухает еще быстрее, чем в случае кранового электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

При частотной системе управления разгон электродвигателя принудительно растягивается во времени за счет плавного повышения частоты питающего напряжения [18]. Кроме того, при пусковой частоте уменьшается и величина синхронной скорости, из-за чего в момент включения электродвигателя область критического скольжения уже оказывается пройденной. Благодаря этому, переходные электрические процессы не оказывают значимого влияния на движущее усилие двигателя.

Таким образом, учет движущего усилия двигателя с помощью статической механической характеристики по формуле (1) применим в случае описания движения крановых приводов, имеющих наиболее распространенные исполнения.

Для описания движущего усилия двигателя при иных способах управления приводом внесем изменения в параметры формулы (2). Такими параметрами являются: критический момент, критическое скольжение и синхронная скорость.

Введение в цепь ротора асинхронного двигателя добавочного сопротивления приводит к снижению критического скольжения в соответствии со следующей зависимостью [19]:

$$s_k^i = \frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (3)$$

где

s_k^i – критическое скольжение на i -й скорости;

R_2 [Ом] – активное сопротивление цепи ротора;

$R_{доб}^i$ [Ом] – добавочное активное сопротивление цепи ротора;

R_1 [Ом] – активное сопротивление обмотки статора;

X_k [Ом] – реактивное сопротивление короткого замыкания;

k – число ступеней дополнительных сопротивлений (искусственных характеристик).

При таком построении системы управления приводом сохраняются синхронная скорость и критический момент. Общий вид характеристик при ступенчатом регулировании представлен на рисунке 2.

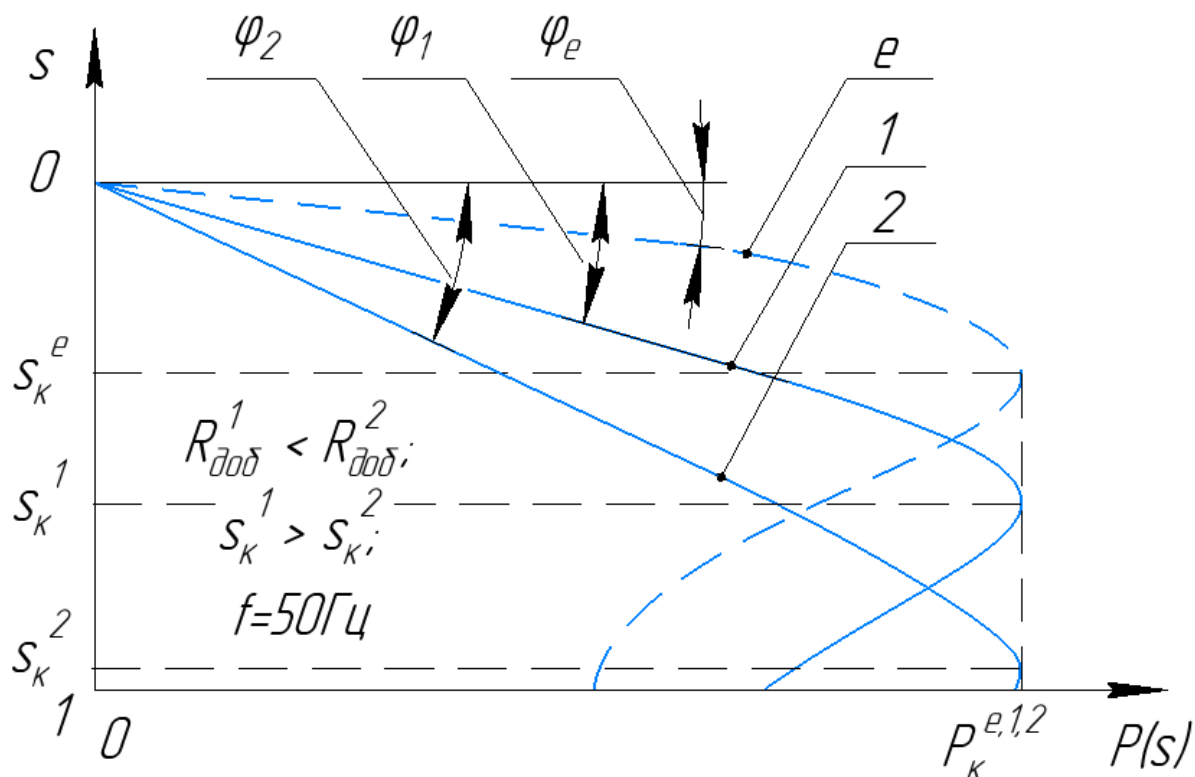


Рисунок 2 – Движущее усилие двигателя при регулировании скорости электродвигателя с фазным ротором включением в роторную цепь дополнительных сопротивлений: s_K^i – критическое скольжение на i -й скорости: $i=e$ – на естественной характеристике, $i=1$ – на первой искусственной характеристике и т.д.
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Motor driving force for speed control of a phase-rotor motor by including additional resistors in the rotor circuit.

s_K^i – critical slip on-speed: $i=e$ – on the main characteristic, $i=1$ – the first position of the command controller corresponding to the minimum speed (the biggest additional resistance), etc.
Source: compiled by the author.

При частотном регулировании (в сторону уменьшения частоты питающей сети) в режиме коррективы напряжения $\frac{f}{U} = \text{const}$ критический момент свое значение на всех искусственных характеристиках. Одновременно пропорционально уменьшению частоты снижается синхронная скорость (рисунок 3) согласно формуле

$$\dot{\chi}_c^f = \frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \dot{\chi}_c^{\text{НОМ}}. \quad (4)$$

Критическое скольжение снижается согласно формуле

$$s_K^f = s_K^{\text{НОМ}} + \left(1 - \frac{f}{f_{\text{НОМ}}}\right), \quad (5)$$

где

$\dot{\chi}_c^f \left[\frac{\text{М}}{\text{с}}\right]$ – синхронная скорость при частотном регулировании;

$f \left[\text{Гц}\right]$ – текущая частота питающего напряжения ($f \in [0; f_{\text{НОМ}}]$);

$f_{\text{НОМ}} \left[\text{Гц}\right]$ – номинальная частота питающего напряжения, равная 50 Гц;

$\dot{\chi}_c^{\text{НОМ}} \left[\frac{\text{М}}{\text{с}}\right]$ – синхронная скорость в номинальном режиме работы электродвигателя;

s_K^f – критическое скольжение при частотном регулировании;

$s_K^{\text{НОМ}}$ – критическое скольжение в номинальном режиме работы электродвигателя.

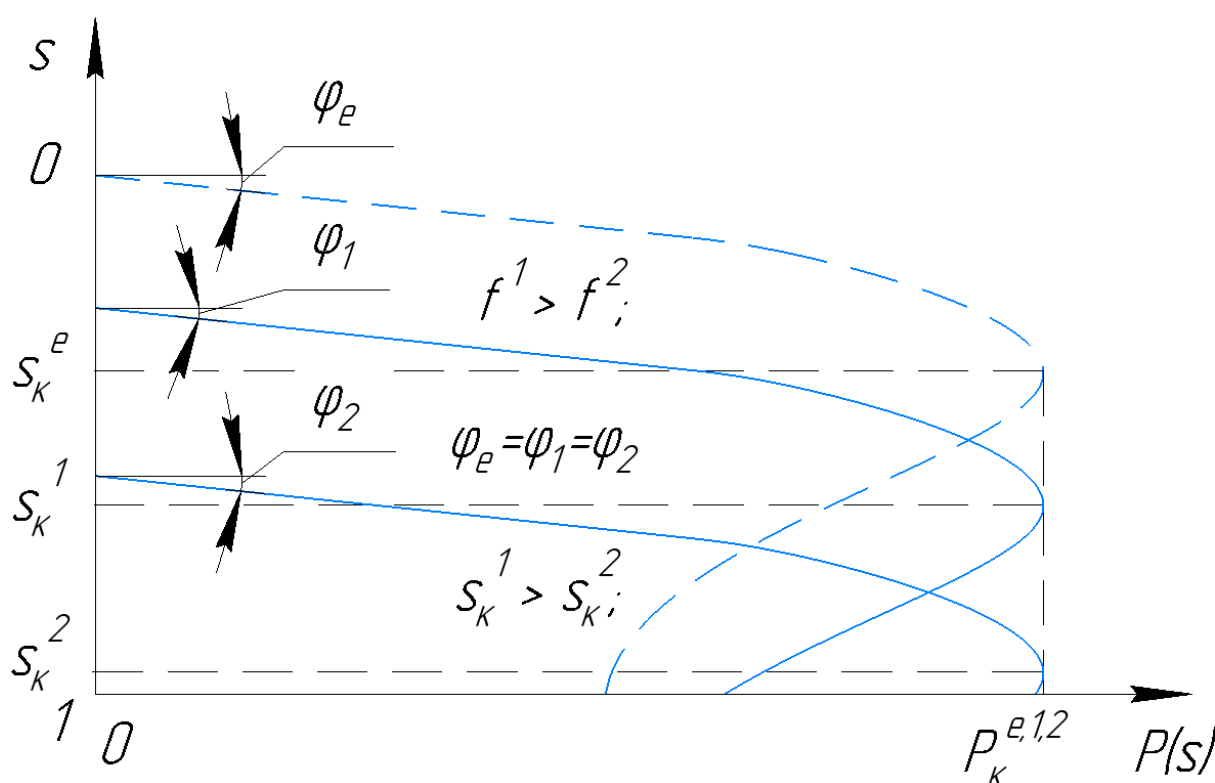


Рисунок 3 – Движущее усилие двигателя с короткозамкнутым ротором и питанием от преобразователя частоты
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Motor driving force for a squirrel cage motor powered by a frequency converter
Source: compiled by the author.

Следует отметить, что в большинстве крановых электроприводов, оснащенных преобразователями частоты, применяется настройка, которая задает алгоритм прохождения переходных процессов пуска и торможения электродвигателя [20]. Пуск и торможение ме-

ханизмов подъема осуществляется по рампе, настраиваемыми параметрами которой являются: начальная и конечная частота питающего напряжения при пуске, конечная частота при торможении и время разгона или торможения (рисунок 4):

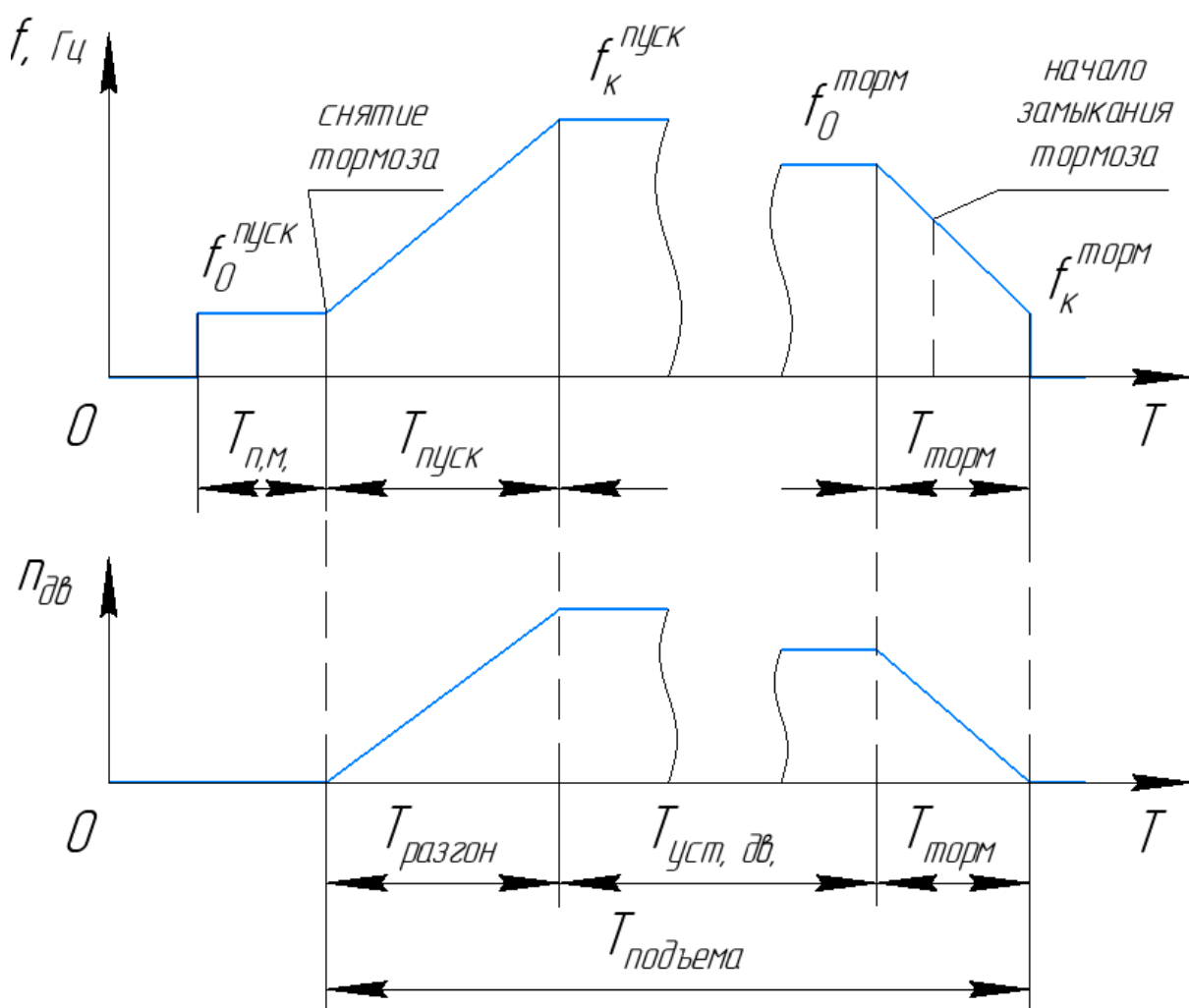


Рисунок 4 – График частоты питающего напряжения во время переходных процессов в случае частотной системы управления:

$f_0^{\text{пуск}}$ – начальная частота при пуске; $f_0^{\text{торм}}$ – начальная частота при торможении;
 $f_к^{\text{пуск}}$ – конечная частота при пуске; $f_к^{\text{торм}}$ – конечная частота при торможении;
 $T_{\text{п.м.}}$ – время пуска механизма; $T_{\text{пуск}}$ – время переходного процесса при пуске;
 $T_{\text{торм}}$ – время переходного процесса при торможении; $T_{\text{разгон}}$ – время разгона механизма;
 $T_{\text{уст.дв.}}$ – время установившегося движения; $T_{\text{подъема}}$ – общее время подъема (от включения механизма до его остановки)

Источник: составлено автором.

Figure4 – Supply voltage frequency during transients in the case of a frequency control system.

$f_0^{\text{пуск}}$ – starting frequency; $f_0^{\text{торм}}$ – initial deceleration frequency;
 $f_к^{\text{пуск}}$ – final starting frequency; $f_к^{\text{торм}}$ – final deceleration frequency;
 $T_{\text{п.м.}}$ – drive start-up time; $T_{\text{пуск}}$ – transient start-up time;
 $T_{\text{торм}}$ – transient deceleration time; $T_{\text{разгон}}$ – acceleration time;
 $T_{\text{уст.дв.}}$ – steady-state time; $T_{\text{подъема}}$ – total hoisting time (from turning the drive on until it stops).

Source: compiled by the author.

Таблица
Основные параметры экспериментальной установки
Источник: составлено автором.

Table
Basic parameters of the experimental system
Source: compiled by the author.

Грузоподъемность крана	Масса груза	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Синхронная частота вращения	Номинальная частота вращения
2 т	2 т	МТКН-112-6	5 кВт	1000 об/мин	910 об/мин
Номинальный крутящий момент, Нм	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$	Момент инерции ротора	Диаметр барабана	Передаточное число редуктора	Кратность полиспаста
52,5	2,3	0,056 кг м ²	0,198 м	38,1	2

Во время пуска и торможения линейный закон изменения частота описывается формулой (6):

$$f = f_0^{\text{пуск}} + \frac{f_0^{\text{пуск}} - f_0^{\text{торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t, t \in [0; t_{\text{пуск/торм}}], \quad (6)$$

где

$f_0^{\text{пуск/торм}}$ [Гц] – начальная частота при пуске / торможении;

$f_k^{\text{пуск/торм}}$ [Гц] – конечная частота при пуске / торможении;

$t_{\text{пуск/торм}}$ [с] – время пуска / торможения.

При этом в течение пуска / торможения непрерывно изменяются синхронная скорость и критическое скольжение, которые описываются формулами (7) и (8) соответственно:

$$\dot{x}_c^f = \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_k^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{\text{ном}}} \dot{x}_c^{\text{ном}}. \quad (7)$$

$$s_k^f = s_k^{\text{ном}} + \left(1 - \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_k^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{\text{ном}}} \right). \quad (8)$$

Для оценки полученных в данной работе зависимостей проведен эксперимент, заключающийся в подъеме груза известной массы краном, оснащенным релейно-контакторной

и частотной системой управления. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201⁶, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана [14]. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице.

При релейно-контакторной системе управления производили подъем с подхватом (двигатель разгоняется до скорости холостого хода на этапе выбора слабины канатов), а при частотной системе управления пуск осуществлялся при выбранной слабине канатов. Таким образом, на доотрывном этапе работы механизма подъема электродвигатель находился в режиме разгона повышением частоты питающего напряжения.

Значения параметров преобразователя частоты: $f_0^{\text{пуск}} = 0$ Гц; $f_k^{\text{пуск}} = 50$ Гц; $t_{\text{пуск}} = 350$ мс.

Производилось измерение усилия в канате накладным тензометрическим датчиком ДНК-1. Параметры аналого-цифрового преобразователя: частота опроса 250 Гц, глубина дискретизации 12 бит. Одновременно производили запись скорости двигателя при помощи тахогенератора.

Теоретическое решение было получено с помощью дифференциальных уравнений для трех этапов:

⁶ Ivanov, S. D. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov, N. L. Mikhalechik // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 марта 2021 года. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

1 – пуска механизма при ослабленных канатах – формула

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P, \quad (9)$$

где

m_1 [кг] – масса вращающихся частей привода, приведенная к поступательному движению груза;

x_1 [м] – перемещение массы m_1 ;

2 – натяжения канатов до отрыва груза от основания – система

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P - S(c_k(S), \Delta x_k); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = S(c_k(S), \Delta x_k) - F_m(c_m(x_t)), \end{cases} \quad (10)$$

где

S [Н] – усилие в канатах;

$c_k \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]$ – жесткость канатов;

Δx_k [м] – текущая деформация канатов;

m_2 [кг] – приведенная масса моста и тележки;

x_2 [м] – перемещение массы m_2 ;

F_m [Н] – усилие в металлоконструкции крана;

$c_m \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]$ – жесткость металлоконструкции крана;

x_t [м] – координата тележки в пролете,

3 – подъема груза – система

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P - c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - c_m(x_t) \cdot x_2; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = c_k(S_0, l_k) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - m_3 \cdot g, \end{cases} \quad (11)$$

где

S_0 [Н] – статическая составляющая нагрузки усилия в канатах при оторванном от основания грузе;

l_k [м] – длина канатов;

x_3 [м] – координата массы m_3 ;

m_3 [кг] – масса груза.

Комбинация данных этапов полно описывает случаи подъема с подхватом (для релейно-контакторной системы управления) и плавного пуска (для частотной системы управления).

Для повышения качества оценки движущего усилия двигателя эксперимент проводился в условиях, при которых не рассматриваемые в данной работе параметры оказывают наименьшее воздействие на динамический процесс. Тележка располагалась в крайнем положении, вследствие чего динамическая схема фактически преобразовалась из трехмассовой в двухмассовую. Таким образом, в динамическом процессе отсутствует гармоника, соответствующая колебанию приведенной массы моста и тележки, а общая погрешность уменьшилась из-за отсутствия необходимости вычисления динамических параметров и .

Решения для этапов динамического процесса подъема груза получены численным интегрированием по методу Рунге-Кутты-Фельберга, реализованном в библиотеке `scipy` на языке программирования Python [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зная, как изменяются в зависимости от типа регулирования скорости параметры статической механической характеристики (синхронная скорость, критическое скольжение и движущее усилие, соответствующее критическому скольжению), по аналогии с формулой для естественной характеристики получены формулы для искусственных, соответствующих релейно-контакторной системе управления и асинхронным электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной обмотке, а также частотной системе управления и асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

Для первого случая использованы формулы (2) и (3). Таким образом, движущее усилие двигателя при ступенчатом управлении приводом имеет вид – формула

$$P_i = 2 \cdot P_K \cdot \dot{x}_c \cdot \left(\frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \right) \cdot \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c - \dot{x}_1)^2 + \left(\frac{R_2 + R_{доб}^i}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \right)^2 \cdot \dot{x}_c}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (12)$$

Для случая частотной системой управления движущее усилие двигателя в случае установившегося движения записывается с учетом формул (2), (4) и (5) и имеет вид формула

$$P_f = \begin{cases} 2 \cdot P_K \cdot s_K^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_K^{f^2} \cdot \dot{x}_c^f}; \\ \dot{x}_c^f = \frac{f}{f_{ном}} \dot{x}_c^{ном}; & f \in [0, 50 \text{Гц}]; \\ s_K^f = \left[s_K^{ном} + \left(1 - \frac{f}{f_{ном}} \right) \right]; \end{cases} \quad (13)$$

А в случае переходных процессов пуска / торможения движущее усилие двигателя при частотной системе управления записывается с учетом формул (2), (7) и (8) и имеет вид – формула

$$P_{f \text{ пуск/торм}} = \begin{cases} 2 \cdot P_K \cdot s_K^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_K^{f^2} \cdot \dot{x}_c^f}; \\ \dot{x}_c^f = \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_K^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{ном}} \dot{x}_c^{ном}, & t \in [0; t_{\text{пуск/торм}}]; \\ s_K^f = s_K^{ном} + \left(1 - \frac{f_0^{\text{пуск/торм}} + \frac{f_K^{\text{пуск/торм}} - f_0^{\text{пуск/торм}}}{t_{\text{пуск/торм}}} t}{f_{ном}} \right); \end{cases} \quad (14)$$

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные усилия в канате и скорости вращения электродвигателя, соответствующие подъему груза с подхватом при релейно-контакторной системе управления и подъему с упругим подхватом при плавном пуске и частотной системой управления.

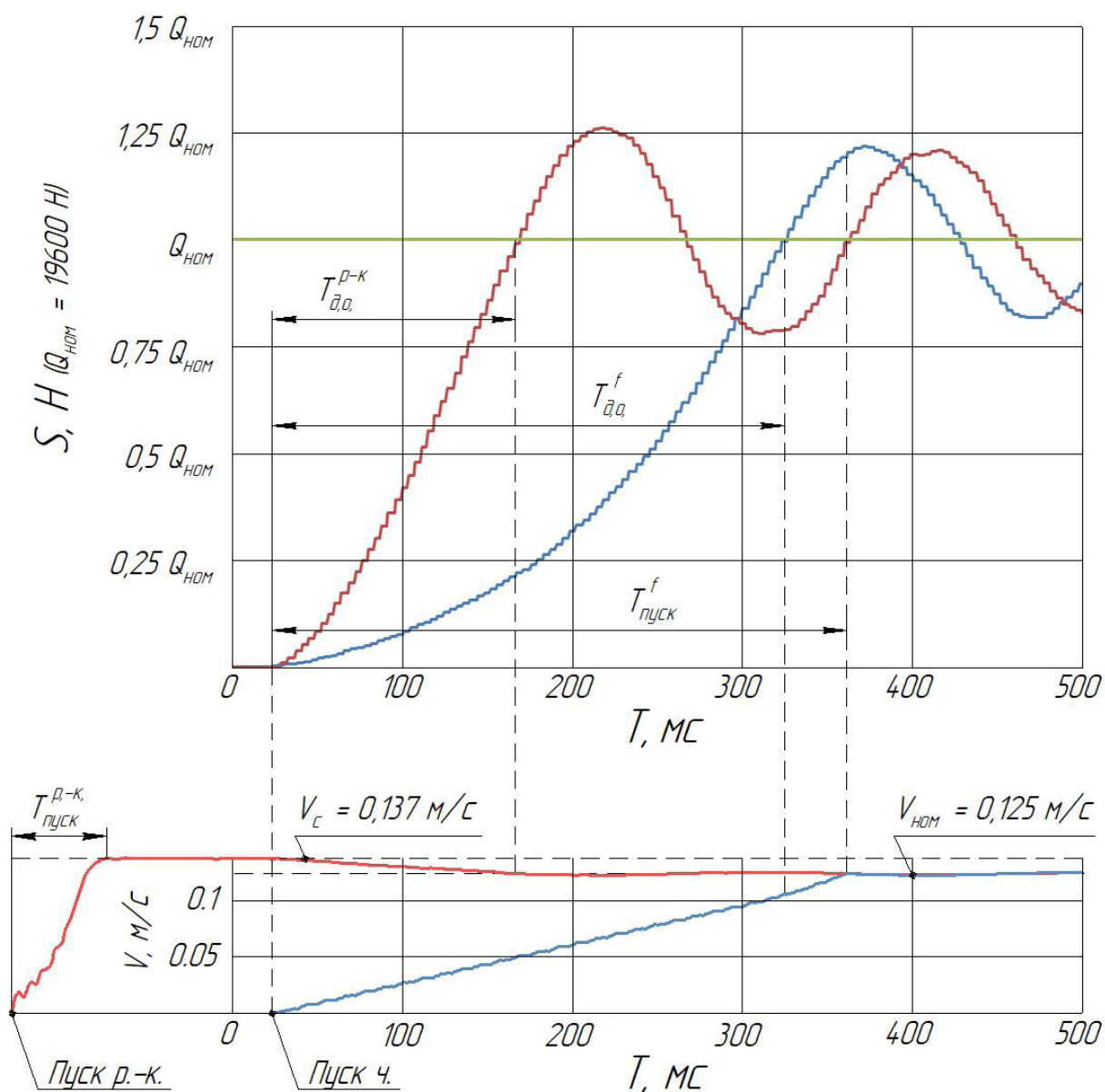


Рисунок 5 – Экспериментальный график усилия в канате и скорости электродвигателя, приведенной к поступательному движению груза, при релейно-контакторной и частотной системе управления;

S – усилие в канате, приведенное к весу груза;

$T_{\text{д.о.}}^{\text{р-к}}, T_{\text{д.о.}}^{\text{ф}}$ – время этапа натяжения канатов до отрыва груза от основания при релейно-контакторной и частотной системе управления соответственно;

$T_{\text{пуск}}^{\text{р-к}}, T_{\text{пуск}}^{\text{ф}}$ – время пуска при релейно-контакторной и частотной системе управления соответственно;

V_c – синхронная скорость двигателя;

$V_{\text{НОМ}}$ – номинальная скорость двигателя

Источник: составлено автором.

Figure 5 – Experimental graph of the rope force and motor speed applied to the forward motion of the load, with relay-contactor and frequency control system;

S – rope tension, adjusted to the load weight;

$T_{\text{д.о.}}^{\text{р-к}}, T_{\text{д.о.}}^{\text{ф}}$ – time of the rope tension stage before the load detaches from the base with relay-contactor and frequency control systems, respectively;

$T_{\text{пуск}}^{\text{р-к}}, T_{\text{пуск}}^{\text{ф}}$ – starting time for relay-contactor and frequency control system, respectively;

V_c – synchronous motor speed;

$V_{\text{НОМ}}$ – rated motor speed

Source: compiled by the author.

На основе приведенных характеристик механизма подъема рассчитаны параметры движущего усилия при релейно-контакторной системе управления:

$$P_k = 20.2 \text{ кН}; \dot{x}_c = 0,137 \text{ М/с}; s_k = 0,38;$$

$$P_{\alpha=1} = 5,535 \cdot \frac{0,137 - \dot{x}_1}{(0,137 - \dot{x}_1)^2 + 0,144 \cdot \dot{x}_c};$$

при частотной системе управления (при пуске механизма / в установившемся режиме):

$$\dot{x}_c^f = \begin{cases} 0,391 \cdot t, t \in [0; 0,35]; \\ 0,137, t \in (0,35; t_{\text{торм}}]; \end{cases}$$

$$s_k^f = \begin{cases} 0,38 + (1 - 2,86 \cdot t), t \in [0; 0,35]; \\ 0,38, t \in (0,35; t_{\text{торм}}]; \end{cases}$$

$$P_f = 40,4 \cdot s_k^f \cdot \dot{x}_c^f \cdot \frac{\dot{x}_c^f - \dot{x}_1}{(\dot{x}_c^f - \dot{x}_1)^2 + s_k^{f2} \cdot \dot{x}_c^f}$$

С помощью систем дифференциальных уравнений (12), (13) и (14) получены решения для соответствующих этапов движения системы. Этапы были сопряжены при помощи граничных условий, в результате получен теоретический график усилия в канатах (рисунок 6):

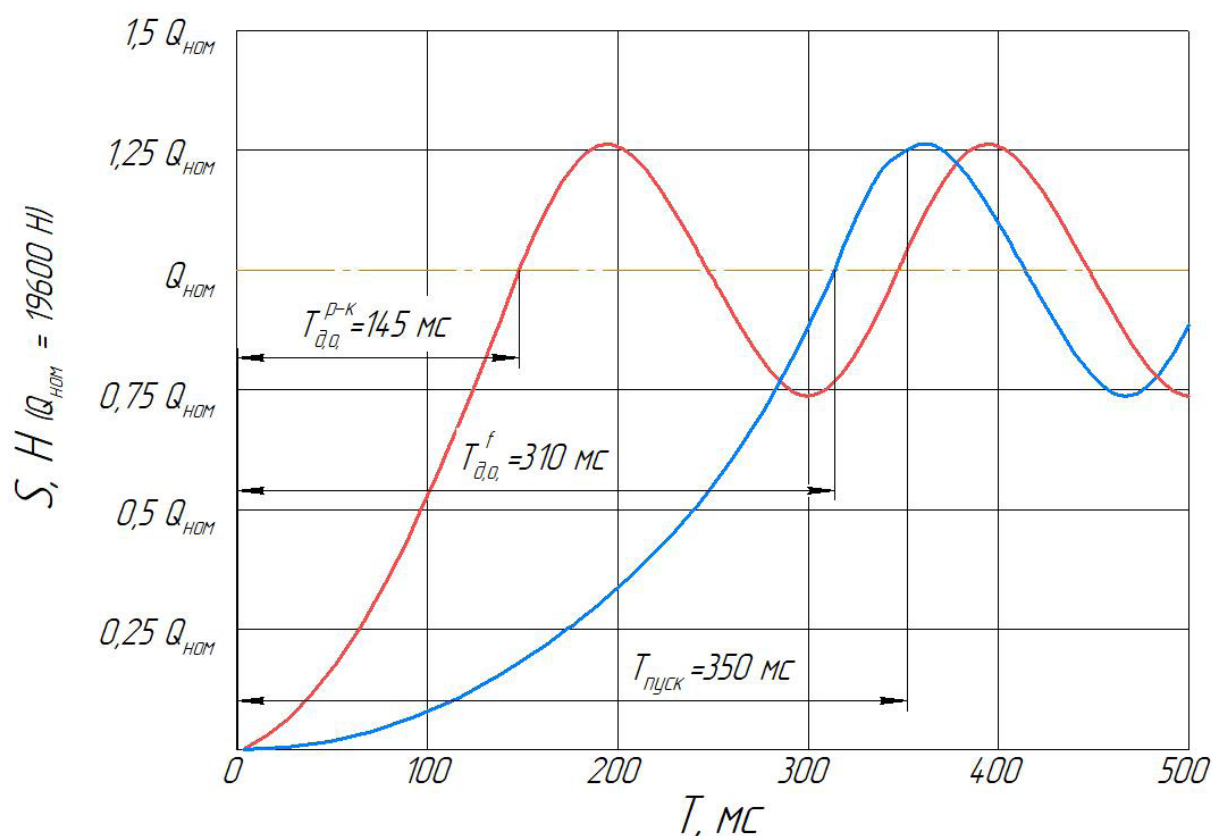


Рисунок 6 – Теоретический график усилия в канате при релейно-контакторной и частотной системе управления
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Theoretical rope tension graph for relay-contactor and frequency control system
Source: compiled by the author.

ВЫВОДЫ

Обоснована применимость статической механической характеристики для описания работы электродвигателя в крановых приводах в силу специфики их конструкции.

В работе получены зависимости, описывающие движущее усилие двигателя крановых приводов с наиболее распространенными системами управления скоростью: релейно-контакторной и односкоростным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, электродвигателем с фазным ротором и дополнительными сопротивлениями в роторной цепи и частотной системой управления и электродвигателем с короткозамкнутым ротором.

Представленные зависимости применимы как во время установившегося движения привода, так и во время переходных процессов пуска в случае релейно-контакторной системы управления и пуска / торможения в случае частотой системы управления.

Полученные в работе экспериментальные данные показывают, что при прямом пуске короткозамкнутого двигателя при номинальных параметрах питающей сети присутствуют колебания скорости, однако их амплитуда мала ($\approx 5\%$ от $V_{ном}$) и в практических расчетах динамики крановых приводов может не учитываться.

В зависимости от системы управления и характера управления механизмом подъема значительно отличается интенсивность этапов до отрыва груза от основания. В случаях, изученных экспериментально, продолжительности доотрывных этапов отличались в 2,4 раза. В то же время величина максимальной динамической нагрузки для двух случаев равна, так как к моменту отрыва скорости практически сравнялись.

Из-за незаметного отличия в динамических нагрузках описывать различные системы управления не возникало необходимости. Однако параметр интенсивности нарастания нагрузки и временные составляющие динамических процессов, непосредственно зависящие от системы и режима управления, оказываются определяющими при анализе работы механизма подъема, оснащенного ограничителем грузоподъемности. Используемый современными ограничителями алгоритм прогнозирования нагрузки (алгоритм с промежуточными порогами) сравнивает нагрузку в момент времени, в который прогнозируется ее максимум, с порогом запрета подъема.

Полученные зависимости предоставляют возможность учесть движущее усилие двигателя в алгоритме работы ограничителя грузоподъемности, что повысит качество его работы. Кроме того, параметры, входящие в состав движущего усилия двигателя, являются паспортными величинами электродвигателя, что обуславливает удобство практической применимости полученных зависимостей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мелехина О. В., Хамула М. А., Ломов М. В. Обеспечение безопасности мостовых кранов с высоким сроком службы // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2019. № 1. С. 128–134. EDN YWTVMD.
2. Извеков Ю. А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19, № 2. С. 98–102. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102. EDN WETHMO.
3. Симонова М. А., Новиков А. В. Методика оценки промышленного риска при перемещении грузов грузоподъемными механизмами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 2(54). С. 203–209. DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0040. EDN POVYPP.
4. Будиков Л. Я., Гусев В. В., Шабельников К. В. Анализ динамики разгона и торможения мостовых кранов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2(88). С. 17–31. EDN FXEFDV.
5. Романова Е. И., Заярный С. Л. Математические модели электропривода кранового механизма // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № 2(24). С. 44–49. EDN EYCDLZ.
6. Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода / С. С. Енин, Е. Я. Омельченко, А. В. Белый, Н. В. Фомин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15, № 3. С. 68–73. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73. EDN ZGRVAP.
7. Романова Е. И., Заярный С. Л. Математические модели электропривода кранового механизма // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № 2(24). С. 44–49. EDN EYCDLZ.
8. Кулябко В. В. Использование динамических характеристик при формообразовании, конструировании и диагностике сложных сооружений, массивов и сред // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2020. № 1(7). С. 236–245. EDN BWXMJJ.
9. Синельщиков А. В., Панасенко Н. Н. Сравнительный анализ расчетно-динамических моделей портовых кранов на основе одно- и двумерных конечных элементов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия:

Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 127–144. DOI 10.24143/2073-1574-2019-2-127-144. EDN CGAFVJ.

10. Шакаров К. К., Иванов С. Д., Носко Л. Определение параметров математической модели механизма подъема мостового крана, оснащенного ограничителем грузоподъемности // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 6. С. 44–47. EDN YQFTZZ.

11. 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. С. 122–131. DOI 10.31897/PMI.2021.1.13. EDN FLZYSZ.

12. Ловейкин В. С., Човнюк Ю. В., Кыдыкало И. А. Уточненный анализ и минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15. № 21. С. 354–361. DOI 10.15593/2224-9923/2016.21.7. EDN YKHMAY.

13. Ермоленко В. А., Витчук П. В. Особенности расчета показателей надежности грузоподъемных машин // Надежность. 2016. Т. 16, № 2(57). С. 20–25. EDN WHGDRJ.

14. Иванов С. Д., Назаров А. И. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.

15. Лобов Н. А. Динамика грузоподъемных кранов. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

16. Шилин А. Н., Арванитаки Н. В., Артюшенко Н. С. Расчет пусковых токов асинхронных электроприводов по схемам замещения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 3. С. 38–42. EDN RXWWAC.

17. Денисов В. А., Третьякова М. Н., Бородин О. А. Сравнительный анализ переходных процессов в асинхронном электродвигателе // Электротехника. 2018. № 3. С. 2–7. EDN VCPNXQ.

18. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети / Ш. Т. Дадабаев, Е. И. Грачева, И. Р. Каримов, С. Валтчев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 1(49). С. 3–15. EDN OOZYKS.

19. Пастухов В. В., Корнеев К. В. Расчет пуска асинхронного двигателя с учетом изменения параметров ротора // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 5. С. 45–52. EDN OIKGGF.

20. Попов Е. В., Онищенко Г. В. Частотно-регулируемый электропривод механизмов грузоподъемных кранов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3–2. С. 179–184. EDN TBRZDJ.

21. Галкин А. В., Дятчина Д. В. Численное решение математических моделей объектов, задан-

ных составными системами дифференциальных уравнений // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. С. 127. EDN OQNHJF.

REFERENCES

1. Melehina O. V., Hamula M. A., Lomov M. V. Obespechenie bezopasnosti mostovykh kranov s vysokim srokom sluzhby [Ensuring the safety of bridge cranes with a high service life]. *Jelettronnyj setevoy politematicheskij zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"*. 2019; 1:128-134. EDN: YWTVMD. (In Russ.)

2. Izvekov Ju. A. Nauchno-metodicheskaja baza ocenki kachestva tehniceskix sistem metallurgicheskogo predpriyatija [Scientific and methodological basis for assessing the quality of technical systems of a metallurgical enterprise]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2021; T. 19. 2: 98-102. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102. EDN: WETHMO. (In Russ.)

3. Simonova M. A., Novikov A. V. Metodika ocenki promyshlennogo riska pri peremeshhenii gruzov gruzopod'emnymi mehanizmami [Methodology for assessing industrial risk when moving cargo by lifting mechanisms]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego plus*. 2021; T. 10. no 2(54): 203-209. DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0040. EDN: POVYPP. (In Russ.)

4. Budikov L. Ja., Gusev V. V., Shabel'nikov K. V. Analiz dinamiki razgona i tormozhenija mostovykh kranov [Analysis of the dynamics of acceleration and braking of overhead cranes]. *Social'no-jekonomicheskie i tehniceskije sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizacija*. 2021; 2(88): 17-31. EDN: FXEFVD. (In Russ.)

5. Romanova E. I., Zajarnyj S. L. Matematicheskie modeli jeletkroprivoda kranovogo mehanizma [Mathematical models of electric crane mechanism drive]. *Jelettronnyj zhurnal: nauka, tehnika i obrazovanie*. 2019; 2(24):44-49. EDN: EYCDLZ. (In Russ.)

6. Enin S. S., Omel'chenko E. Ja., Belyj A. V., Fomin N. V. Opisanie dvizhenija mehanizmov mostovogo kрана uravnenijami Lagranzha II roda [Description of the movement of bridge crane mechanisms by Lagrange equations of the second kind]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2017; T. 15. no 3: 68-73. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73. EDN ZGRVAP. (In Russ.)

7. Romanova E. I., Zajarnyj S. L. Matematicheskie modeli jeletkroprivoda kranovogo mehanizma [Mathematical models of electric crane mechanism drive]. *Jelettronnyj zhurnal: nauka, tehnika i obrazovanie*. 2019; 2(24): 44-49. EDN: EYCDLZ. (In Russ.)

8. Kuljabko V. V. Ispol'zovanie dinamicheskix harakteristik pri formoobrazovanii, konstruirovanii i diagnostike slozhnyh sooruzhenij, massivov i sred [The use of dynamic characteristics in shaping, designing and diagnostics of complex structures, arrays and environments]. *Sovremennye innovacionnye tehnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlja gornoj promyshlennosti i transporta*. 2020; 1(7): 236-245. EDN: BWX-MJJ. (In Russ.)

9. Sinel'shnikov A. V., Panasenkov N. N. Sravnitel'nyj analiz raschetno-dinamicheskikh modelej portovykh kranov na osnove odno- i dvumernykh konechnykh jelementov [Comparative analysis of computational and dynamic models of port cranes based on one- and two-dimensional finite elements]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serija: Morskaja tekhnika i tekhnologija*. 2019; 2: 127-144. DOI 10.24143/2073-1574-2019-2-127-144. EDN: CGAFVJ. (In Russ.)
10. Shakarov K. K., Ivanov S. D., Nosko A. L. Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli mehanizma pod'ema mostovogo kрана, osnashhennogo ogranichitelem gruzopod'emnosti [Determination of parameters of a mathematical model of the lifting mechanism of a bridge crane equipped with a load capacity limiter]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2017; T. 78. no 6: 44-47. EDN: YQFTZZ. (In Russ.)
11. Semykina I. Ju., Kipervasser M. V., Gerasimuk A. V. Issledovanie tokov privoda pod'ema mostovykh kranov metallurgicheskikh predpriyatij dlja rannego diagnostirovaniya prevysheniya massy gruzha [Investigation of the lifting drive currents of bridge cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of excess weight of cargo]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021; T. 247: 122-131. DOI 10.31897/PMI.2021.1.13. EDN: FLZYSZ. (In Russ.)
12. Lovejkin V. S., Chovnjuk Ju. V., Kadykalo I. A. Utochnennyj analiz i minimizacija dinamicheskikh nagruzok v uprugih jelementah gruzopod'emnykh mashin [Refined analysis and minimization of dynamic loads in elastic elements of lifting machines]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2016; T. 15. no 21: 354-361. DOI 10.15593/2224-9923/2016.21.7. EDN: YKHMAY. (In Russ.)
13. Ermolenko V. A., Vitshuk P. V. Osobennosti rascheta pokazatelej nadezhnosti gruzopod'emnykh mashin [Features of calculating reliability indicators of lifting machines]. 2016; T. 16. no 2(57): 20-25. EDN: WHGDRJ. (In Russ.)
14. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>
15. Lobov N. A. *Dinamika gruzopod'emnykh kranov* [Dynamics of lifting cranes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987:160.
16. Shilin A. N., Arvanitaki N. V., Artjushenko N. S. Raschet puskovykh tokov asinhronnykh jelektroprivodov po shemam zameshheniya [Calculation of starting currents of asynchronous electric drives according to substitution schemes]. *Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost'*. 2015; 3: 38-42. EDN: RXWWAC. (In Russ.)
17. Denisov V. A., Tret'yakova M. N., Borodin O. A. Sravnitel'nyj analiz perehodnykh processov v asinhronnom jelektrodvigatеле []. *Jelektrotehnika*. 2018; 3: 2-7. EDN: VCPNXQ. (In Russ.)
18. Dadabaev Sh. T., Gracheva E. I., Karimov I. R., Valtchev S. Issledovanie puskovykh rezhimov asinhronnykh dvigatelej pri nizkom kachestve jelektrojenergii pitajushhej seti [Comparative analysis of transients in an asynchronous electric motor]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*. 2021; T. 13. № 1(49): 3-15. EDN OOZYKS. (In Russ.)
19. Pastuhov V. V., Korneev K. V. Raschet puskasinhronnogo dvigatelja s uchedom izmeneniya parametrov rotora [Investigation of starting modes of asynchronous motors at low quality of power supply network]. *Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost'*. 2011; 5: 45-52. EDN: OIKGGF. (In Russ.)
20. Popov E. V., Onishchenko G. B. Chastotno-reguliruemyy jelektroprivod mehanizmov gruzopod'jomnykh kranov [Calculation of asynchronous motor start taking into account changes in rotor parameters]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010; 3-2: 179-184. EDN: TBRZDJ. (In Russ.)
21. Galkin A. V., Djatchina D. V. Chislennoe reshenie matematicheskikh modelej ob'ektov, zadannykh sostavnyimi sistemami differencial'nykh uravnenij [Numerical solution of mathematical models of objects given by composite systems of differential equations]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011; 6: 127. EDN OQNHJF. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Назаров Александр Николаевич – аспирант, ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы», SPIN-код: 2028-7651.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander N. Nazarov –Postgraduate student, Assistant of the Lifting and Transport Systems Department, SPIN-код: 2028-7651.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья

УДК656.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

EDN: FJRONG



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ «О РАВНОВЕСИЯХ (РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЯХ)» ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДА

И. Е. Агуреев*, А. В. Ахромешин, В. А. Пышный

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
 agureev-igor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>
 aakhromeshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8016-9655>
 vladislav.pyshnyi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье сформулированы постановки задач о равновесных состояниях в модели обобщенной транспортной системы города, состоящей из улично-дорожной сети, центров массового тяготения, мест проживания людей, транспортных средств, а также самих участников дорожного движения, в том числе и пассажиров. Решение этих задач позволяет выявлять равновесные распределения элементов системы по различным подмножествам состояний (подмножество элементов улично-дорожной сети, подмножество центров массового тяготения, подмножество поездок определенного типа и т.д.), зависящие от типа транспортного средства, индивидуальных предпочтений, знаний о состоянии транспортной системы и других факторов.

При этом транспортная система рассматривается как объект исследований в рамках теории макросистем. Набор постановок задач о поиске равновесных состояний транспортной системы для различных объектов моделирования составлен для различных структурных уровней (масштабов) рассматриваемых объектов.

Материалы и методы. В настоящей работе применяется теория транспортных макросистем, которая вытекает из известной научной дисциплины – теории макросистем. Среди ее задач имеются постановки о распределении элементов по подмножествам состояний и задачи о равновесии системы в целом. В макроскопических системах по определению стохастическое поведение большого числа элементов преобразуется в детерминированное поведение системы в целом. Макросистема является динамическим преобразователем хаотического поведения элементов в некоторое множество параметров поведения (фазовых переменных), образующих пространство небольшой размерности. Поэтому в рамках теории макросистем используются базовые понятия максимизации энтропии при равновесных состояниях системы. При этом функция распределения макросостояний выбирается в зависимости от способа заполнения элементами некоторых состояний из соответствующих подмножеств; необходимые значения априорных вероятностей и доказательства параметрических свойств моделей макросистем с различными статистиками (ферми-, зейнштейн- и больцман-распределения). На основе теории макросистем решаются, например, задачи для поиска равновесия в таких системах, как: 1) мегаполис с его функциональной и пространственной структурами (вероятностные состояния иерархических систем); 2) транспортные сети городов, образованные перемещениями транспортных средств и жителей города между различными районами (распределение поездок по маршрутам в сети); 3) логистические системы при межрегиональном обмене продукцией (задачи экономического равновесия при обмене ресурсами).

Результаты. В работе представлены результаты исследований, касающиеся единообразного описания элементов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как компонентов общей транспортной системы города (агломерации) в рамках теории транспортных макросистем. При этом в исследовании выделяются различные структурные уровни описания, которые могут использоваться для решения частных задач, например, о поиске равновесия в отдельных подмножествах транспортной системы, таких как группы центров массового тяготения определенного типа, или транспортные потоки на маршрутах, перегонах, участках сети и т.п.

Обсуждение и заключение. В рамках работы решены следующие задачи: разработано описание структурных уровней объектов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как основных компонентов модели транспортных систем; разработаны постановки задач о равновесных состояниях

© Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

транспортных систем на соответствующих структурных уровнях; выполнен анализ полученной методики; установлена методическая аналогия между различными подмножествами состояний на одном и том же структурном уровне, например, между центрами массового тяготения и элементами улично-дорожной сети как объектов моделирования методами теории макросистем (эта аналогия может быть распространена и на другие подмножества состояний в транспортных системах, например, на виды транспортных систем, цели поездок, парковочные пространства, подсистемы интеллектуальной транспортной системы и многое другое).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория макросистем, улично-дорожная сеть, центр массового тяготения, транспортная система, подмножество состояний, равновесные состояния

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 09.12.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А. Постановка задач «О равновесиях (равновесных состояниях)» транспортных систем города // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 52-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

EDN: FJRONG

EQUILIBRIA (EQUILIBRIUM STATES) PROBLEM STATEMENT FOR CITY TRANSPORT SYSTEMS

Igor E. Agureev*, Andrey V. Akhromeshin, Vladislav A. Pyshnyi

Tula State University, Tula, Russia

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

aakhromeshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8016-9655>

vladislav.pyshnyi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article formulates the problems statement about equilibrium states in the model of a generalized transport system of the city, consisting of a street and road network, centers of mass gravity, places of residence of people, vehicles, as well as road users themselves, including passengers. The solution of these problems makes it possible to identify the equilibrium distributions of the system elements over various subsets of states (a subset of the elements of the road network; a subset of the center of mass gravity; a subset of trips of a certain type, etc.), depending on the type of vehicle, individual preferences, knowledge about the state of the transport system and other factors.

At the same time, the transport system is considered as an object of research within the framework of the theory of macrosystems. A set of problems statements on the search for equilibrium states of the transport system for various modelling objects has been compiled for various structural levels (scales) of the objects under consideration.

Materials and methods. In this paper, the theory of transport macrosystems is applied, which follows from a well-known scientific discipline - the theory of macrosystems. Among its tasks there are statements about the distribution of elements over subsets of states and problems about the equilibrium of the system as a whole. In macroscopic systems, by definition, the stochastic behavior of a large number of elements transforms the deterministic behavior of the system as a whole. A macro system is thus a dynamic converter of the chaotic behavior of elements into a certain set of behavior parameters (phase variables) forming a space of small dimension. Therefore, within the framework of the theory of macrosystems, the basic concepts of entropy maximization at equilibrium states of the

© Agureev I. E., Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A., 2023



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

system are used. In this case, the distribution function of macrostates is selected depending on the method of filling some states with elements from the corresponding subsets; the necessary values of a priori probabilities and proofs of parametric properties of models of macrosystems with various statistics (Fermi-, Einstein- and Boltzmann-distributions). On the basis of the theory of macrosystems, for example, problems are solved to find equilibrium in such systems as: 1) megapolis with its functional and spatial structures (probabilistic states of hierarchical systems), 2) transport networks of cities formed by the movement of vehicles and residents of the city between different areas (distribution of trips along routes in the network); 3) logistics systems in the interregional exchange of products (problems of economic equilibrium in the exchange of resources).

Results. The paper presents the results of research concerning the uniform description of the elements of the road network and the centers of mass gravity as components of the general transport system of the city (agglomeration) in the framework of the theory of transport macrosystems. At the same time, the study identifies various structural levels of description that can be used to solve particular problems, for example, finding equilibrium in individual subsets of the transport system, such as groups of centers of mass gravity of a certain type, or traffic flows on routes, stretches, network sections, etc.

Discussion and conclusions. Within the framework of the work, the following tasks were solved: a description of the structural levels of the objects of the road network and the centers of mass gravity as the main components of the model of transport systems was developed; the formulation of problems about the equilibrium states of transport systems at the corresponding structural levels was developed; the analysis of the obtained methodology was performed; a methodological analogy is established between different subsets of states at the same structural level, for example, between the centers of mass gravity and elements of the road network as objects of modeling by methods of the theory of macrosystems (this analogy can be extended to other subsets of states in transport systems, for example, types of transport systems, travel purposes, parking spaces, subsystems of the intelligent transport system and much more).

KEYWORDS: theory of macrosystems, street and road network, center of mass gravity, transport system, subset of states, equilibrium states

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.

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 09.12.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Agureev I. E., Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A. Equilibria (equilibrium states) problem statement for city transport systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 52-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

ВВЕДЕНИЕ

В статье сформулированы постановки задач о равновесных состояниях в модели обобщенной транспортной системы города, состоящей из улично-дорожной сети (УДС), центров массового тяготения (ЦМТ), мест проживания людей, транспортных средств, а также самих участников дорожного движения, в том числе и пассажиров. Решение этих задач позволяет выявлять равновесные распределения элементов системы по различным подмножествам состояний (подмножество элементов улично-дорожной сети; подмножество центров массового тяготения; подмножество поездок определенного типа и т.д.), зависящие от типа транспортного средства (ТС), индивидуаль-

ных предпочтений, знаний о состоянии транспортной системы и других факторов.

В настоящей работе транспортная система последовательно рассматривается как объект исследований в рамках теории макросистем.

Целью данной работы является формулировка набора постановок задач о поиске равновесных состояний транспортной системы для различных объектов моделирования, таких как УДС и ЦМТ на различных структурных уровнях (СУ) детализации (масштаба) рассматриваемых объектов.

Равновесие в транспортной системе, например, равновесное распределение потоков (матрица корреспонденций и графы УДС), изучают такие авторы, как А.Дж. Вильсон¹[1, 2],

¹ Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем: пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. М.: Наука, 1978. 247 с.

В.И. Швецов² [3, 4, 5], А.В. Гасников [6] и др. Из зарубежных источников дополнительно стоит отметить работы [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Задача транспортного равновесия сводится к решению задачи оптимизации, при этом обычно используются гравитационные или энтропийные методы расчета. В настоящей статье последовательно реализуются принципы энтропийного подхода и выбор соответствующей схемы заполнения элементов по подмножествам состояний как наиболее общий подход, основанный на аналогии между большими системами различной физической природы (в данном случае между физическими системами и городскими системами).

В рамках работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать описания структурных уровней объектов УДС и ЦМТ как основных компонентов (множеств состояний) в модели транспортных систем.
2. Записать постановки задач о равновесных состояниях транспортных систем на соответствующих СУ.
3. Выполнить анализ полученной методики.
4. Установить аналогию между ЦМТ и УДС в смысле объектов моделирования методами теории макросистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе применяется теория транспортных макросистем, которая вытекает из известной научной дисциплины – теории макросистем. Среди ее задач имеются постановки о распределении элементов по подмножествам состояний и задачи о равновесии системы в целом [17, 18].

Напомним основные положения теории макросистем, которые являются традиционными (по Ю. С. Попкову):

«- макросистема представляет собой динамическую систему, содержащую большое количество элементов со стохастическим поведением, состояния которых трансформируются в квази-детерминированное состояние системы как целого;

- основными понятиями и методами теории макросистем является функция распределения макросостояний; априорные вероятности состояний; методы моделирования равновесных макросостояний, основанные на принципе максимизации энтропии; исследования параметрических свойств моделей макросистем;

- в качестве моделей распределения элементов по подмножествам состояний теория макросистем использует следующие схемы, взятые из статистической физики: F-состояния (ферми-состояния, когда в каждом состоянии может находиться только один элемент); E-состояния (эйнштейн-состояния, когда в каждом состоянии может находиться любое количество элементов); В-состояния (больцман-состояния, когда в каждом состоянии может находиться некоторое количество элементов) и соответствующие методы статистик Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна;

- теория применяется для изучения таких классов систем, как экономический обмен, распределение и обмен ресурсами (например, межрегиональный обмен продукцией); транспортные потоки (перемещение транспортных средств и пассажиров между различными транспортными районами, соединенными в транспортную сеть); вероятностные иерархические структуры (функционально-пространственная структура города); восстановление изображений по проекциям; многокомпонентные смеси (химические технологии). Что касается последних двух систем, то они также могут найти применение при моделировании транспортных систем, например, при расчете взаимодействия видов транспорта или при выявлении характерных образцов транспортного поведения».

Для того чтобы корректно формулировать и решать задачи теории транспортных макросистем, воспользуемся представлением транспортной системы в виде необходимого модельного описания.

В наиболее общем случае транспортная система распределенных в системе элементов (например, транспортных средств) может быть выражена в виде совокупности уравнений и неравенств в соответствии с работой [19]:

² Швецов В. И., Алиев А. С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. М.: УРСС, 2003. 61 с.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^{v_f=N_a} \Delta\tau_k; \\ V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^l n_v(t) | v \in p_\alpha\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\ G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V^*(\Delta\tau_k)) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\tilde{\Gamma}$ – граф УДС; ρ – транспортные связи; q – действующие провозные (пропускные) способности; t – непрерывное время; $v_f=N_a$ – наибольший индекс ТС, соответствующий количеству ТС на сети в данный момент времени; V_α – общее число маршрутов (корреспонденций); v – индекс ТС (его постоянный идентификатор); n_v – булева переменная, которая определяется соотношением (2); p_α – α -й маршрут; π_v – уравнение транспортного процесса для v -ого ТС; Π – основное уравнение транспортного процесса; β – индекс транспортного процесса; G_p – функция затрат ресурсов (расход ресурсов); g_v – удельный расход ресурса для каждого ТС; 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 однозначно определенным, и тогда уравнения $\pi_\beta(t)$ тоже становятся определены.

Представленная система содержит равновесное решение $V^*(\Delta\tau_k)$, которое достигается в транспортной системе к концу отрезка времени $\Delta\tau_k$ за счет наиболее вероятного распределения ТС 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 $\Delta\tau_k$.

Отметим, что для модели (1) – (2) необходимо ввести описания используемых ресурсов и условий их расходования. Традиционно в виде таких ресурсов используем время, материальные ресурсы, денежные средства и их различные виды.

Однако для наших целей в настоящей статье недостаточно иметь формулировку транспортной системы в виде (1). Причина заключается в том, что необходимо иметь более широкий класс элементов транспортной системы, не только транспортные средства, но и пассажиров, пешеходов, водителей, которые могут находиться в иных состояниях, отличных от принадлежности к участку УДС.

Поэтому запишем обобщенную модель макросистемы в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{S} = \tilde{S}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ E(t) = \{E_1, \dots, E_\alpha, \dots, E_p : E_\alpha = \sum_{e=1}^{e_f} n_e(t) | e \in s_\alpha\}; \\ e = 1, \dots, e_f(t); \\ \pi_e = \pi_e(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_f}(t)\}; \\ G(t) = g_e \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(E^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m E_n \ln \frac{E_n}{a_n} - (G_n + E_n) \ln(G_n + E_n) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (3)$$

В системе (3) замена количества ТС (V) на количество элементов e (или множества состояний S) подразумевает то, что обобщенная система может быть записана в виде частного случая, где каждому элементу e может быть поставлен в соответствие конкретный вид элемента:

$$\begin{aligned} e \in E &= \{v; r; p; \dots\}; \\ s \in S &= \{r; c; v; \dots\}, \end{aligned}$$

где v – ТС; r – маршрут; p – пассажир (пешеход); c – корреспонденция. Кроме этого, в (2) обозначено $\tilde{S} = \tilde{S}(t)$ как множество состояний элементов. В частности, если $\tilde{S} = \tilde{F}$, то мы имеем граф УДС, состоящий из совокупности связей, каждая из которых заполняется элементами (транспортными средствами). В иной постановке $\tilde{S} = \tilde{S}(t)$ может представлять собой одно из следующих множеств: совокупность ЦМТ; совокупность видов транспорта; множество целей поездок и т.д. Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет теперь наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, транс-

портно-пересадочные узлы (ТПУ) между различными видами транспортных систем и т.д. Соотношение $q = q(t)$ устанавливает пропускные способности, соответствующие интенсивностям обслуживания элементами подмножеств состояний (пропускная способность парковочных зон, ТПУ, ЦМТ и т.д.).

На (3) накладывается требование, чтобы пары элементов, входящих в множества E и S , образовывали реалистичные постановки задач.

Дальнейшие методики получения постановки задачи о равновесии транспортной системы проводятся в следующем порядке:

1) для каждого выбранного СУ дается лингвистическое описание системы;

2) описываются элементы и их состояния (в рамках соответствующего СУ), а также способ заполнения подмножеств состояний элементами (так называемых статистик в рамках теории макросистем, см. выше);

3) делается вывод о возможности применения теории макросистем на рассматриваемых СУ.

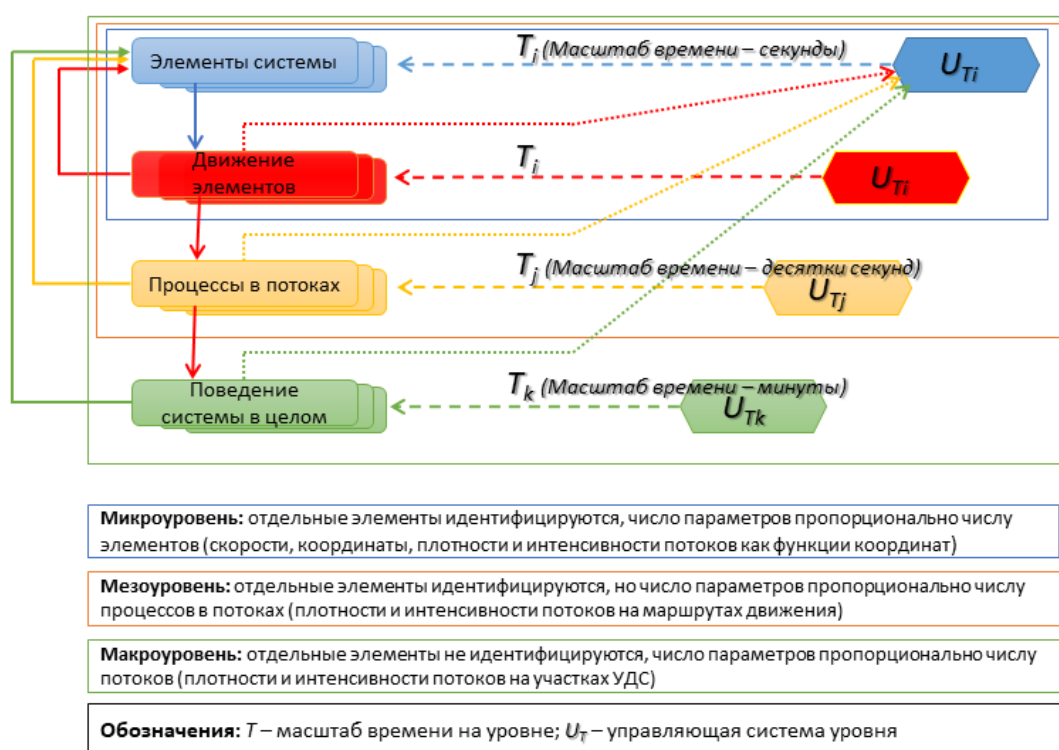


Рисунок 1 – Феноменологическая схема транспортной системы города
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Phenomenological diagram of the transport system in a city
Source: compiled by the authors.

МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ МАКРОСИСТЕМ

Согласно идеям Ю. С. Попкова^{3, 4, 5} транспортную систему города можно представить как сложную систему, феноменологически состоящую из трех уровней: макроуровень (показатели состояния системы); микроуровень (показатели состояния элементов); мезоуровень (формирование показателей состояния системы).

Графически данную структуру можно показать следующим образом (рисунок 1).

Поясим данный рисунок на примере перемещений пассажиров: транспортная система множества индивидуальных перемещений [20, 21, 22] на микроуровне (с набором состояний и параметров индивидуального ТС) образует пассажиропотоки, объединенные на-

мезоуровне (со своим набором состояний и параметров, относящихся уже к транспортным процессам на каждом выделенном маршруте), что, в свою очередь, приводит к образованию на верхнем уровне транспортной системы (макроуровне) корреспонденций между транспортными районами города (агломерации) (с набором состояний и параметров потоков на отдельных участках УДС, при этом информация о том, из каких маршрутов складываются эти потоки, может теряться).

Ниже, для иллюстрации того, как решается задача о разработке описаний структурных уровней объектов УДС и ЦМТ как основных компонентов (множеств состояний) в модели транспортных систем, приведено описание УДС и ЦМТ на различных структурных уровнях.

³ Попков Ю. С. Макро системные модели пространственной экономики. М.: КомКнига/URSS, 2007. 2013.

⁴ Попков Ю. С. Теория макросистем: равновесные модели / Ю.С. Попков. М.: Эдиториал УРСС. 1999. 320 с.

⁵ Развитие больших городов в условиях переходной экономики (системный подход) / В. И. Ресин, Ю.С. Попков. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 326 с.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ УДС

1. Корреспонденции

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя корреспонденции на УДС, по которым идет перемещение транспортных средств между разными районами города по различным целям [3, 4].

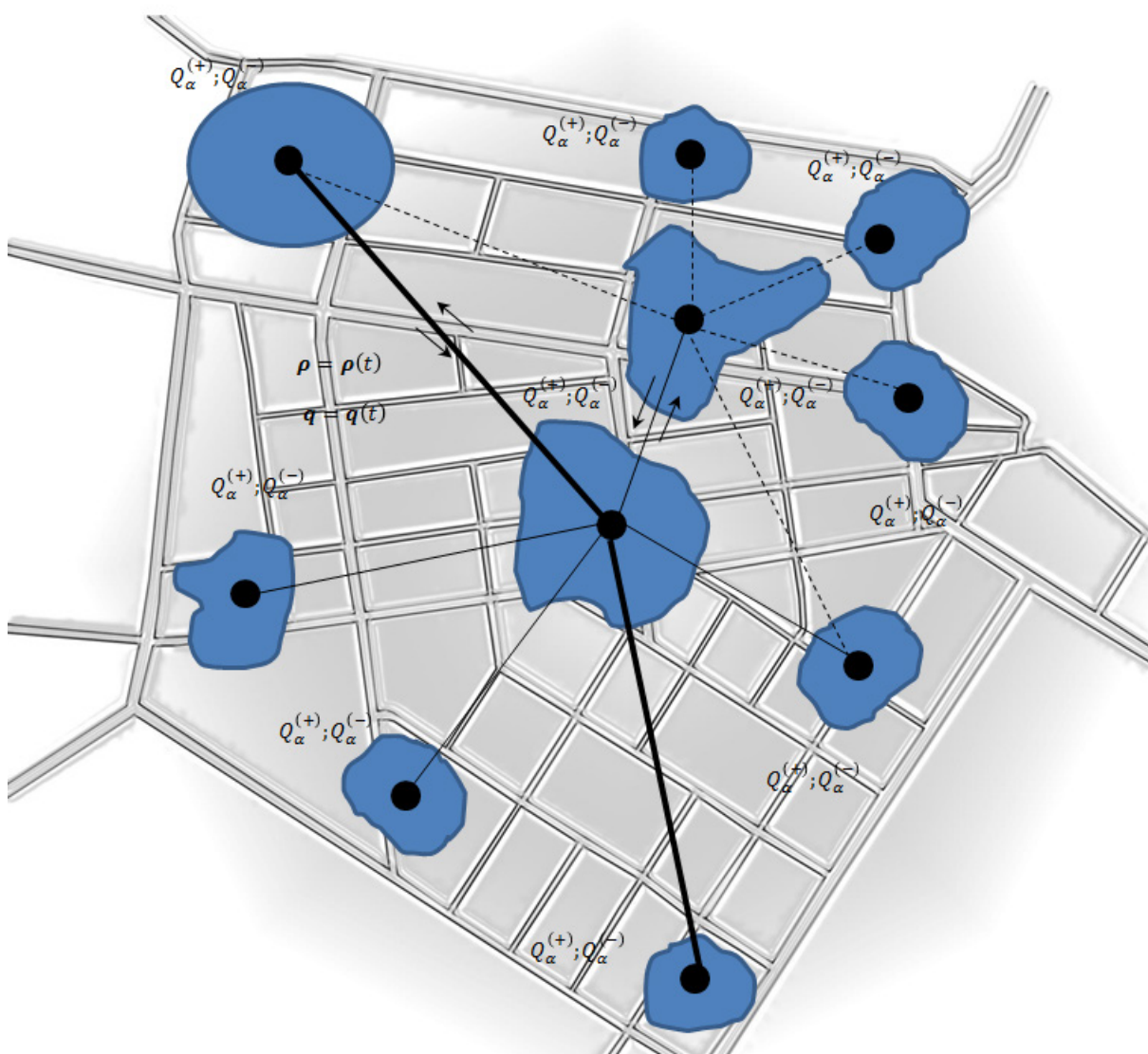


Рисунок 2 – Схема транспортных связей (корреспонденций) между районами
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagram of transport links (correspondence) between districts
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – множество корреспонденций.

Подмножество состояний – корреспонденция с конкретной целью.

Таблица 1

Описание элементов структурного уровня «Корреспонденция»

Источник: составлено авторами.

Table 1

Description of the elements of the Correspondence structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Корреспонденция	2. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
	3. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Можно построить аналогичные описания для различных транспортных систем. Этобудет ото-
бражением расщепления по видам транспорта.

Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении корреспонденций между транспортными районами города;
- 2) о распределении корреспонденций по целям поездок.

В соответствии со временем суток и характерным днем элементы множества J имеют разную ёмкость, в том числе и нулевую.

2. Корреспонденция

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя единственную корреспонденцию на всей УДС, по которой идет перемещение транспортных средств между начальной и конечной точкой корреспонденции (в прямом и обратном направлениях).

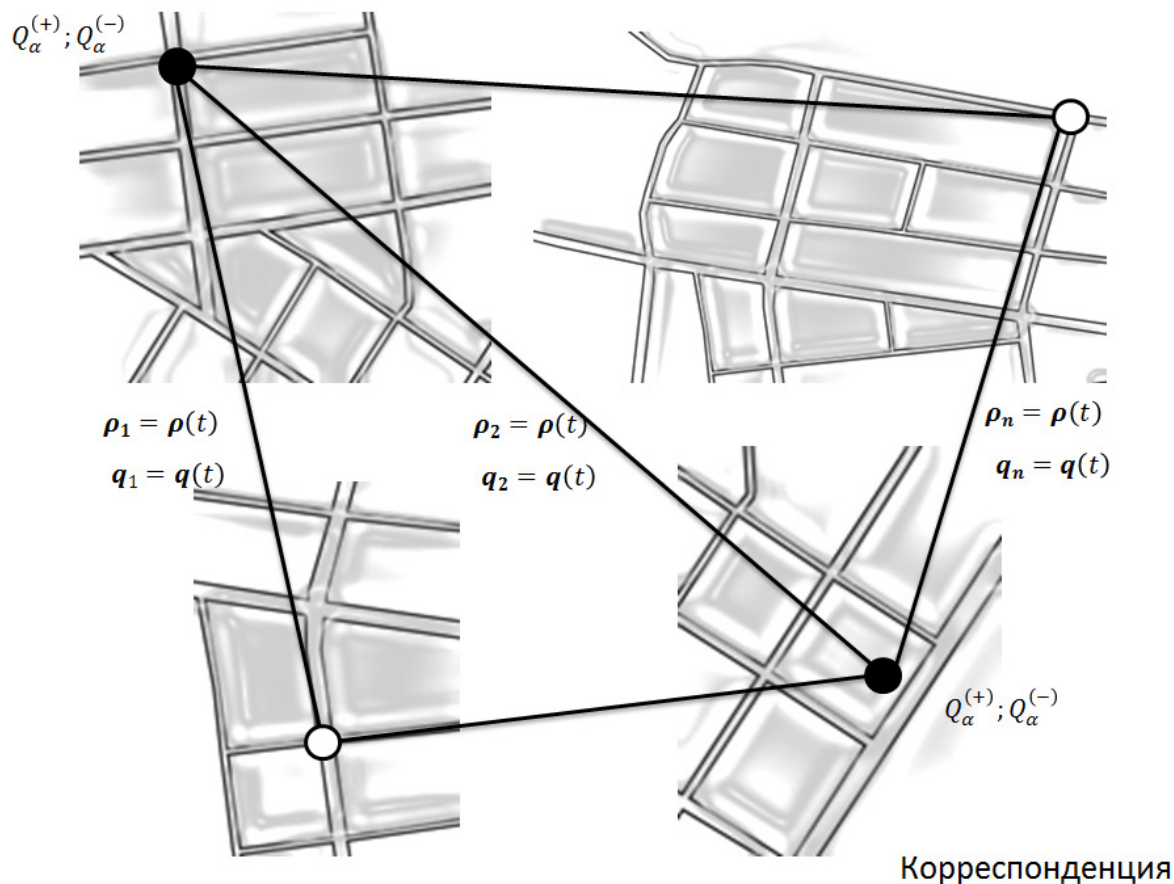


Рисунок 3 – Схема транспортной связи с маршрутами (корреспонденция)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagram of transport communication with routes (correspondence)
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – корреспонденция с конкретной целью поездки.

Подмножество состояний – маршруты, которые образуют корреспонденцию.

Таблица 2

Описание элементов структурного уровня «Корреспонденция»

Источник: составлено авторами.

Table 2

Description of the elements of the Correspondence structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Маршрут	2. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
	3. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении поездок по корреспонденции в прямом и обратном направлениях;
- 2) о распределении по корреспонденции различных видов грузов и целям поездок (трудовые, социальные и т.д.);
- 3) расчет предельной емкости одной корреспонденции в одном или разных направлениях.

3. Маршрут

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя одну корреспонденцию на всей УДС, по которой идет перемещение транспортных средств между начальной и конечной точкой корреспонденции (в прямом и обратном направлениях).

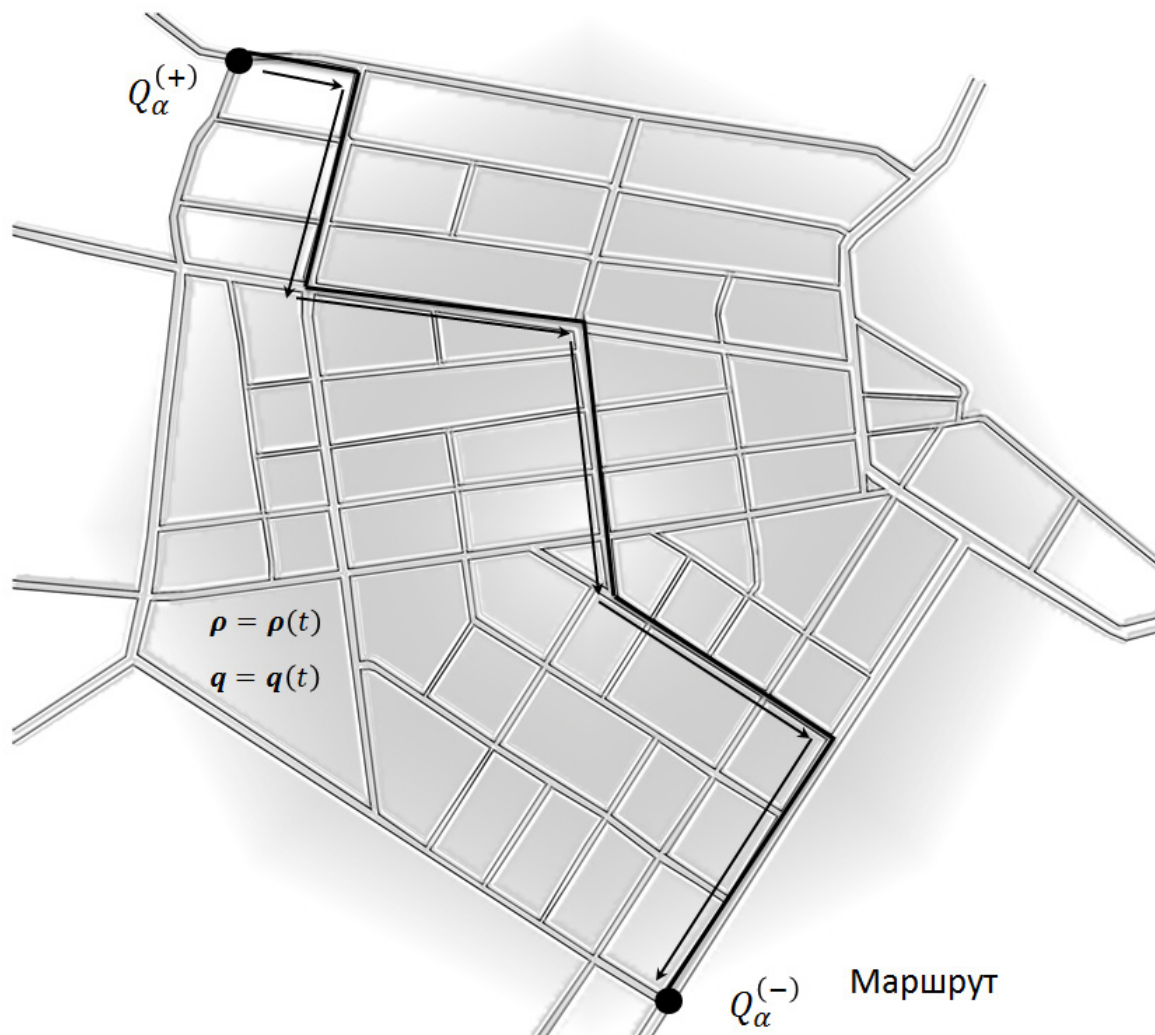


Рисунок 4 – Схема маршрута
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Route diagram
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – маршруты, которые образуют корреспонденцию.

Подмножество состояний – маршрут с конкретной целью.

Таблица 3

Описание элементов структурного уровня «Маршрут»

Источник: составлено авторами.

Table 3

Description of the elements of the Route structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Маршрут	2. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
5. Перегон	3. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) В-система 2) Р-система

Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении поездок по маршруту в целом и каждому перегону в частности;
- 2) о распределении по маршруту поездок с различными целями (трудовые, социальные и т.д.);
- 3) расчет предельной емкости одного перегона и маршрута.

Примечание: на рисунках 2, 3, 4 индексы величин $Q_{\alpha}^{(+)}$; $Q_{\alpha}^{(-)}$ опущены для улучшения восприятия представленных схем различных структурных уровней УДС.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ЦМТ

1. ЦМТ в целом

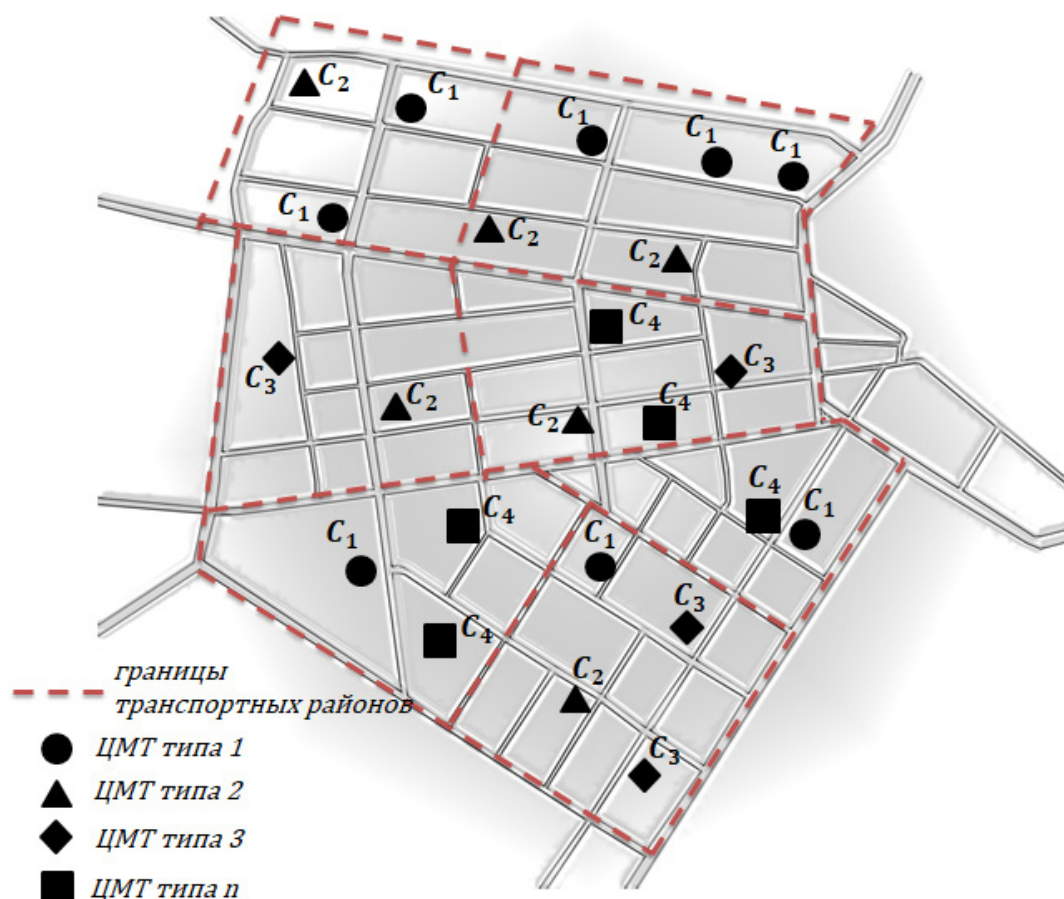


Рисунок 5 – Схема расположения ЦМТ различных типов
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Arrangement of ITC of different types
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя УДС и все ЦМТ с их парковочными пространствами (рис. 5), которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к любой городской функции (за исключением жилого сектора). Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи [4, 20, 23, 24]:

- 1) о распределении элементов (таблица 4) на территориях ЦМТ (во время получения услуг операция транспортного процесса – ожидание);
- 2) о распределении движущихся элементов к ЦМТ (операция транспортного процесса – транспортировка) и их разновидности⁶.

В соответствии с рассматриваемым временем суток и характерным днем элементы множества S имеют разную ёмкость, в том числе и нулевую.

Множество состояний

ЦМТ всех типов (кроме жилого сектора) для получения услуг

Подмножество состояний

ЦМТ конкретного типа

⁶ Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников и др. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.

Таблица 4
Описание элементов структурного уровня «ЦМТ в целом»
Источник: составлено авторами.

Table 4
Description of the elements of the ITC as a whole structural level
Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
ТС	Элемент i находится на парковке ЦМТ j -го типа
Маршрутное ТС	Элемент i находится на остановочном пункте s , находящимся в пешей доступности к ЦМТ j -го типа
Участник дорожного движения (водитель индивидуального транспортного средства, пассажир, пешеход)	Элемент i посещает ЦМТ j -го типа с целью получения услуги
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Примечания:

*Могут быть использованы и другие типы статистик в зависимости от размера населенного пункта и времени суток.

**Описанные у Ромма⁷ городские функции, по мнению авторов, не полностью охватывают все стороны жизнедеятельности социума, с этой позиции в таблицу 5 были добавлены 4 дополнительные функции.

$J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ множество типов ЦМТ для получения услуг, выделенных по городским функциям** [8, 25, 26, 27, 28].

Таблица 5
Описание элементов структурного уровня «Наименование типа ЦМТ для получения услуг»
Источник: составлено авторами.

Table 5
Description of the elements of the Name of the type of ITC for receiving services structural level
Source: compiled by the authors.

№	Наименование типа ЦМТ для получения услуг
1	Промышленность различных видов
2	Коммунально-складское хозяйство
3	Общественно-торговые центры
4	Медицинские, спортивные, детские и другие специализированные центры
5	Торговля различных иерархических уровней и различной специализации
6	Объекты здравоохранения различных видов
7	Объекты образования различных видов
8	Административно-офисные комплексы
9	Рекреации и естественные ландшафты
10	Территории специального назначения (захоронений)
11	Объекты транспорта
12	Культурные
13	Объекты военного назначения

⁷ Ромм А. П. Комплексная оценка и функциональное зонирование территории в градостроительном проектировании: дис. ... д-ра архитектуры: 18.00.04. Москва, 2002. 206 с.

В некоторых работах по географии городов вместо термина «макрофункция» используется термин «группа видов деятельности», причем выделяется три группы видов деятельности [26, 27]: группа первичных (жилье), вторичных (производство) и третичных (торговля, транспорт, управление) видов деятельности.

Понятие городской функции обладает внутренней сложностью. Большинство городских

2. ЦМТ конкретного типа

функций являются представителями не одной, а двух или трех макрофункций. Так, функция «жилье» в любом российском городе содержит в себе жилье как таковое (жилые дома), обслуживание и места приложения труда (магазины, комбинаты бытового обслуживания (КБО), школы, детские сады и т.д.). Во многих случаях приходится иметь дело с функциями, представляющими собой конгломераты других городских функций.

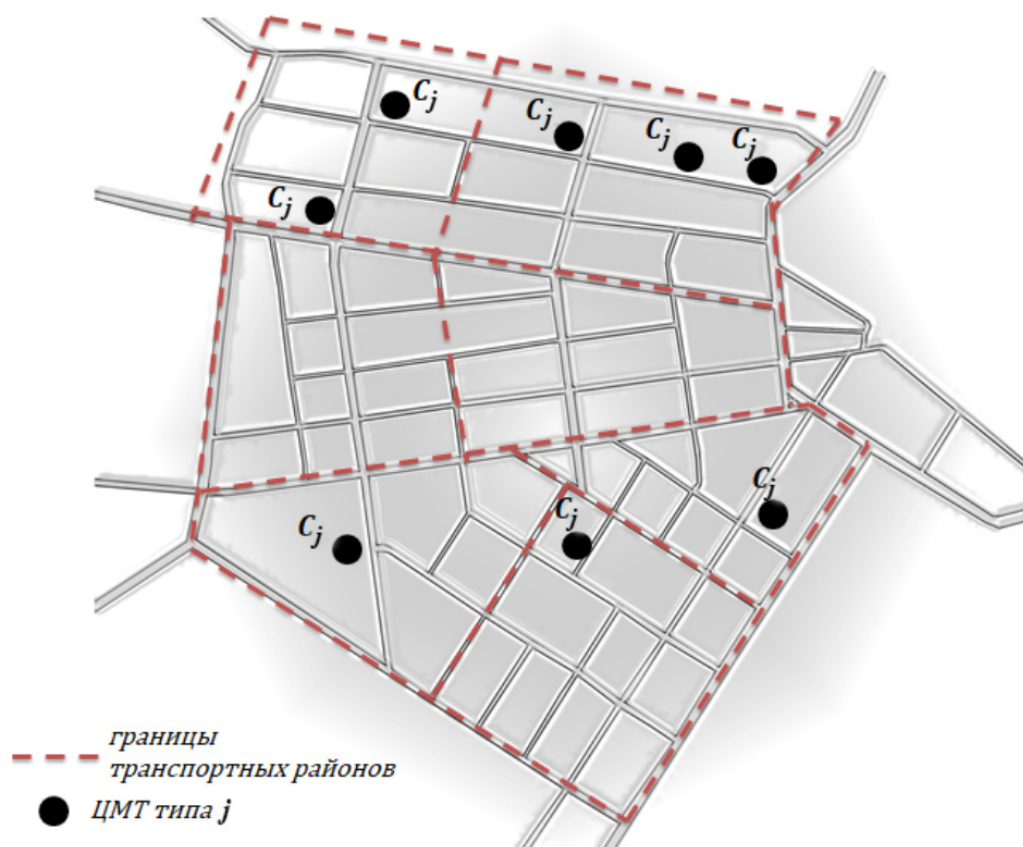


Рисунок 6 – Схема расположения ЦМТ одного типа
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – ITC layout of one type
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя УДС и ЦМТ с их парковочными пространствами, которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к определенной городской функции (за исключением жилого сектора), представлена на рисунке 6.

Е, В-система – вводится классификация ЦМТ, которая справедлива для уровня 2 и 3.

Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи о распределении элементов (таблица 6) на территориях ЦМТ конкретного типа (во время получения услуг операция транспортного процесса: ожидание).

Множество состояний

ЦМТ типа ТЦ (пример)

Подмножество состояний

Конкретные ТЦ (или страта: микрорайонные, районные, окружные, региональные ТЦ)

Таблица 6

Описание элементов структурного уровня «ЦМТ конкретного типа»

Источник: составлено авторами.

Table 6

Description of the elements of the ITC of a specific type structural level

Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
ТС	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ микрорайонного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ районного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ окружного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ регионального значения
Маршрутное ТС	Элемент <i>i</i> находится на остановочном пункте <i>s</i> , находящимся в пешей доступности к ЦМТ микрорайонного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ районного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ окружного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ регионального значения
УДД (водитель индивидуального транспортного средства, пассажир, пешеход)	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ микрорайонного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ районного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ окружного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ регионального значения с целью получения услуги
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Примечание.

*Могут быть использованы и другие типы статистик в зависимости от размера населенного пункта, времени суток, объема парковочного пространства, ёмкости ЦМТ, характера конкретной городской функции рассматриваемого ЦМТ.

3. Конкретный ЦМТ

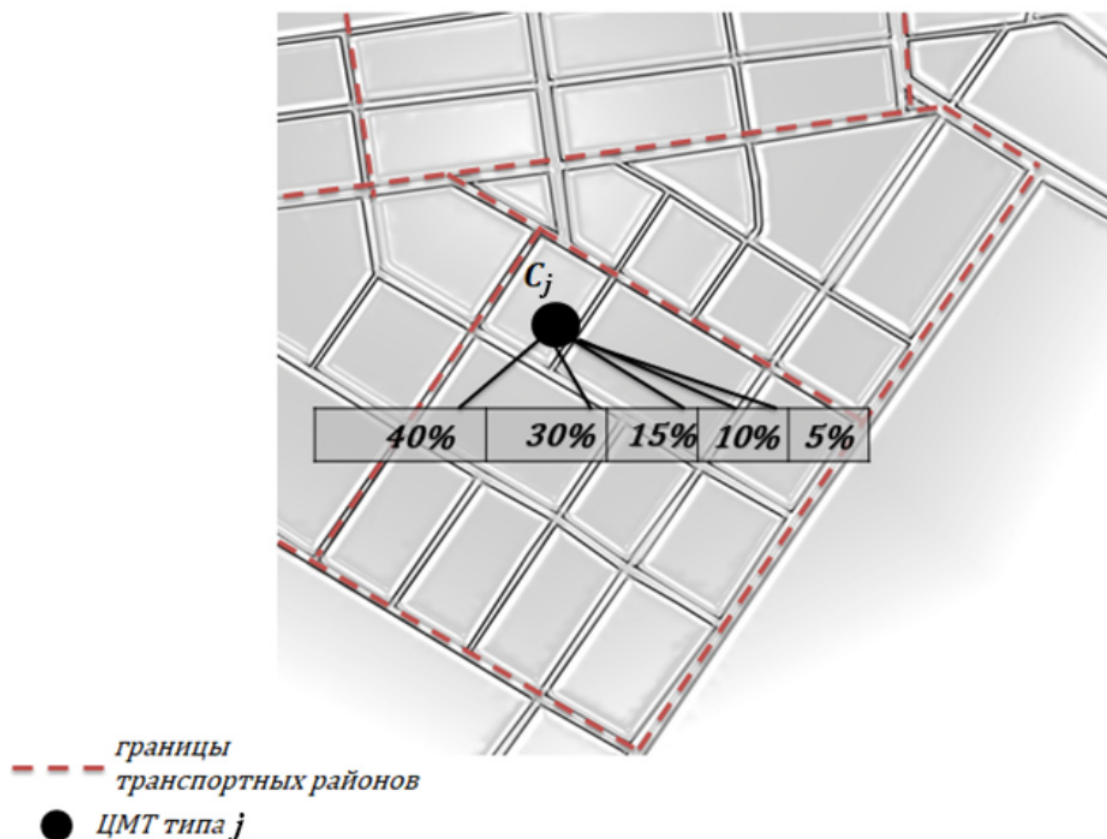


Рисунок 7– Схема долевого распределения целей поездок для ЦМТ
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Shared distribution of travel objectives for ITC
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя территорию ЦМТ с её парковочными пространствами, которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к определенной городской функции (за исключением жилого сектора), представлена на рисунке 7.

Е, В-система – вводится классификация ЦМТ, которая справедлива для уровня 2 и 3.

Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении элементов (таблица 7) на территориях ЦМТ конкретного типа (во время получения услуг операция транспортного процесса – ожидание);
- 2) о распределении движущихся элементов к ЦМТ конкретного типа (операция транспортного процесса – транспортировка) и их разновидности.

Множество состояний

«Посетители» («места»)

Подмножество состояний

«Места» посетителей, прибывающих различными способами (по типам ТС)

Таблица 7

Описание элементов структурного уровня «Конкретный ЦМТ»

Источник: составлено авторами.

Table 7

Description of the elements of the Specific WTC structural level

Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
УДД (водитель, пассажир, пешеход)	Элемент <i>i</i> прибывает пешком в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на общественном транспорте в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на личном транспорте в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на такси в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на каршеринге в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> находится в исследуемом ТЦ
	Местоположение элемента <i>i</i> и цели его передвижений не связаны с исследуемым ТЦ
ТС	Элемент <i>i</i> находится на парковке конкретного ЦМТ
Маршрутное ТС	Элемент <i>i</i> находится на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к конкретному ЦМТ

Анализ методики постановки задач о равновесных состояниях транспортных систем на соответствующих СУ заключается в следующем:

- 1) выбирается подмножество состояний для соответствующих элементов исходя из практического задания на проектирование;
- 2) выбирается необходимый структурный уровень описания транспортной системы;
- 3) составляется соответствующая система уравнений и неравенств типа (3);
- 4) выполняется описание этой системы и делается схема численного расчета.

Приведем пример использования этой методики. Предположим, задача заключается в поиске равновесного состояния распределения посетителей ЦМТ конкретного типа (мезоуровень). Решается задача типа: элемент i посещает ЦМТ регионального значения с целью получения услуги (см. таблицу 6). Тогда система типа (3) выглядит следующим образом:

запишем модель системы для мезоуровня в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ P(t) = \{P_1, \dots, P_\alpha, \dots, P_p : P_\alpha = \sum_{p=1}^{p_f} n_p(t) | p \in T_\alpha\}; \\ p = 1, \dots, p_f(t); \\ \pi_p = \pi_p(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{p_f}(t)\}; \\ G(t) = g_p \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(P^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m P_n \ln \frac{P_n}{a_n} - (G_n + P_n) \ln(G_n + P_n) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (4)$$

где p – пассажир (пешеход), прибывший в ЦМТ; T – территория конкретного ЦМТ. Кроме этого, в (4) обозначено $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ пространство прибытия-убытия ЦМТ (парковочное пространство ЦМТ). Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, перераспределение посетителей ЦМТ (в случае альтернативных посещений ЦМТ и др.) Соотношение $q = q(t)$ устанавливает пропускные способности, соответствующие связям между элементами подмножества состояний. $\pi_p = \pi_p(t)$ при этом становится характеристикой процесса, выполняемого участниками ДД в данном ЦМТ, а именно остановка на получение услуги данного ЦМТ.

Данная задача требует предварительной подготовки исходных данных о количестве, расположении, емкостях подмножества состояний, а именно конкретных парковочных зон, принадлежащих ЦМТ, а также расчета априорных вероятностей, что является достаточно нетривиальной задачей и характеризует спрос каждого конкретного ЦМТ.

Таким образом, используя обобщенную модель макросистемы (3) можно сформулировать достаточно большое число задач, описанных в таблицах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Имея совокупность подобных постановок задач, можно обратить внимание, что постановки задач о распределении транспортных средств по сети и о распределении участни-

ков ДД по территориям ЦМТ аналогичны и могут решать совместно на каждом структурном уровне. Это дает возможность не просто описывать центры генерации и поглощения транспортных средств как неких абстрактных объектов, а выполнять их существенную детализацию с точки зрения соответствующих реальных возможностей конкретных ЦМТ. Таким образом, возникает возможность ставить и решать связанные задачи равновесия различных макросистем на одном и том же структурном уровне (или даже разных).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассмотрено описание обобщенной транспортной системы в терминах теории транспортных макросистем. Транспортная система, состоящая из множеств отличающихся элементов, может демонстрировать совершенно различные равновесные состояния на разных структурных уровнях (макро-, мезо-, микро-) и для элементов разного типа (например, транспортные средства, участники дорожного движения, пользователи транспортной системы: водители, пешеходы и др.). Поэтому исследования были направлены на разработку единообразного описания формулировок задач о поиске равновесия в подсистемах разных структурных уровней. При этом в исследовании выделяются конкретные частные задачи, например, о поиске равновесного распределения посетителей в группе

ЦМТ определённого типа или транспортных средств в транспортных потоках [27, 28, 29, 30] на маршрутах⁸, перегонах, участках сети⁹ и др.

Отмечается наличие аналогий описания равновесий для распределения посетителей ЦМТ и для распределения транспортных средств на УДС на соответствующих СУ.

СУ могут использоваться и для классификации различных частных случаев транспортных систем, а также для выявления той границы, при достижении которой макросистемное описание становится невозможным (стохастическое поведение элементов не преобразуется в детерминированное поведение системы).

Постановка каждой задачи сопровождается соответствующей подготовкой системы (3): выбор типа элемента, выбор множества и подмножеств состояний, обоснование способа заполнения подмножества состояний элементами (В-, Е-, F-системы), определение типа ресурса и способа его расходования, вычисление априорных вероятностей для элементов, а также обоснование применимости макроскопического подхода для рассматриваемого структурного уровня. После этого следует выбор необходимой численной схемы, которая представляет собой тот или иной алгоритм реализации метода неопределенных множителей Лагранжа.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы решены следующие задачи: разработано описание структурных уровней множеств объектов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как основных компонентов транспортных макросистем; разработаны постановки задач о поиске равновесных состояний транспортных систем на соответствующих структурных уровнях; выполнен анализ полученной методики, а также установлена аналогия описания равновесий для распределения посетителей ЦМТ и для распределения транспортных средств на УДС на соответствующих СУ в смысле общности постановки задач моделирования методами теории макросистем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wilson A. G. Ecological and urban systems models: some explorations of similarities in the context of complexity theory. *Environment and Planning A*, 2006; 38(4), 633–646.
2. Wilson A.G. The Future of Urban Modelling. *Appl. Spatial Analysis* 11, 647–655 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9258-6>.
3. Швецов В. И. Проблемы моделирования передвижений в транспортных сетях // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Том 2, № 4. С. 169–179.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Banks C.M. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains, John Wiley and Sons, Hoboken NJ, 2010. Pp. 1-24.
8. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *J. American Instit. Planners*. 1956. V. 22. P. 94–102.
9. de Martinis V., Pagliara F., & Wilson A.G. (2014). The evolution and planning of hierarchical transport networks. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 41(2). 192–210.
10. Dieleman F.M., Dijkstra M., and Burghouwt G. (2002). "Urban form and travel behavior: micro-level household attributes and residential context." *Urban Studies*, Vol. 39, No. 3, pp. 507–527, DOI: 10.1080/00420980220112801.
11. Ellam L. Stochastic modelling of urban structure/ L. Ellam, M. Girolami, G. A. Pavliotis, A. Wilson // 2018 Proc. R. Soc. A 20170700. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2017.0700>.
12. Goulias K. G., Kitamura R. Recursive model system for trip generation and trip chaining. *Transportation Research Record*, 1991, Vol. 1236, pp. 59–66.
13. Hauslbaue A. L., SchadeJ., Drexler C.E. Extending the theory of planned behavior to predict

⁸ Агуреев И. Е. Модельное представление транспортной системы города (агломерации) с позиций теории макросистем / И. Е. Агуреев, А. В. Ахромешин // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2021): Сборник статей XIII Международной научно-технической конференции, Курск, 20 ноября 2021 года / Отв. редактор Е.В. Агеев. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021 С. 20–23.

⁹ Агуреев И. Е. Транспортная модель для обоснования принимаемых решений с целью совершенствования организации движения грузового автомобильного транспорта / И. Е. Агуреев, В. А. Пышный, В. А. Митюгин // Сборник научных статей X 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.

and nudge toward the subscription to a public transport ticket. *Eur. Transp. Res. Rev.* 14, 5, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00528-3>.

14. Javid M. A., Okamura T., Nakamura F. People's behavioral intentions towards public transport in Lahore: Role of situational constraints, mobility restrictions and incentives. *KSCE J CivEng* 20, 401–410 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12205-015-1123-4>.

15. Li, W Exploring Resident's Daily Activity-Travel Behavior: Activity Pattern, Duration and Competition / W. Li, H. Guan, Y. Han // *KSCE J CivEng* 25, 3121–3135 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2013-6>.

16. Matyas M. Opportunities and barriers to multimodal cities: lessons learned from in-depth interviews about attitudes towards mobility as a service. *Eur. Transp. Res. Rev.* 12, 7 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0395-z>.

17. Feng J. The impacts of household structure on the travel behaviour of seniors and young parents in China. / J. Feng, M. Dijst B. Wissink J. Prillwitz. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 3. pp. 117–126, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.03.008.

18. Modeling of the city transport flows as applied to the Moscow agglomeration / A. S. Aliev, V. I. Shvetsov, A. I. Strel'nikov, Yu. Z. Shershevskii // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66. No 11. P. 1805-1815. DOI 10.1007/s10513-005-0214-y.

19. Агуреев И. Е. Развитие теории макросистем как необходимое условие повышения качества транспортного моделирования // *Мир транспорта*. Москва, 2020. № 2 (Т. 18). С. 6–20.

20. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19, № 6(97). С. 13–18. DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2.

21. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т. 18, № 6(82). С. 746–758. DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758.

22. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2021. № 2. С. 60–70. DOI 10.25198/2077-7175-2021-2-60.

23. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных систем // *Мир транспорта и технологических машин*. Орел: ГТУ, 2009. № 2. С. 3–16.

24. Banerjee A. Understanding activity engagement and time use patterns in a developing country context, Doctoral dissertation, University of South Florida, 2006.

25. Бурков Д. Г., Зедгенизов А. В. Математическое описание транспортного спроса к объектам культурно-бытовой направленности // *Вестник ИрГТУ*. 2016. Т. 20, № 12. С. 201–209.

26. Zedgenizov A.V. Assessment of the impact of capital construction on the adjacent street-road network with traffic at unregulated intersections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh

- 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012066. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012066. EDN AMGLHB.

27. Zeng M. Stochastic route choice models based on VMS information and hierarchy for urban transport network / M. Zeng, Z. Ling, B. Zhang // *KSCE J CivEng* 22, 850–858, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0107-y>.

28. Zedgenizov A.V., Seliangin K., Efremenko I. Methodology for assessing required area for allocating centers of mass attraction in layout of urbanized territories and their impact on quality of traffic management in adjacent street and road network. *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. pp. 743-748.

29. Solodkiy A.I., Chernikh N. V. Improving the level of traffic service on the road network of cities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012044. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012044. EDN MLKHOA.

30. Tyrinopoulos Y., Antoniou C. Factors affecting modal choice in urban mobility. *Eur. Transp. Res. Rev.* 5, 27–39, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0088-3>.

REFERENCES

1. Wilson A. G. Ecological and urban systems models: some explorations of similarities in the context of complexity theory. *Environment and Planning A*, 2006; 38 (4): 633–646.

2. Wilson A.G. The Future of Urban Modelling. *Appl. Spatial Analysis* 11, 647–655 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9258-6>.

3. Shvecov V. I. Problemy modelirovaniya peredvizhenij v transportnyh setjah TRUDY MFTI [Problems of movement modeling in transport networks]. *TRUDY MFTI*. 2010; Tom 2. No 4: 169–179. (In Russ.)

4. Shvecov V. I., Strel'nikov A. I., Shvecov V. I., Shershevskij Ju. Z. Modelirovanie transportnyh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeracii [Modeling of traffic flows in a large city with application to the Moscow agglomeration]. *Automatic i telemekhanika*. 2005; 11: 113–125. (In Russ.)

5. Shvecov V. I., Mazurin D. S., Maksimova D. A., Shvecov V. I., Aliev A. S. Struktura kompleksnoj modeli transportnoj sistemy g. Moscow. [Structure of the integrated model of the transport system in Moscow]. *Trudy ISA RAN*. 2015; T.65, no 1: 3-15. (in Russ.)

6. Gasnikov A.V., Gasnikova E.V. O vozmozhnoj dinamike v modeli raschjota matricy korrespondencij (A. Dzh. Vil'sona) [On the possible dynamics in the model of calculating the correspondence matrix (A. J. Wilson)]. *TRUDY MFTI*. 2010; T. 2. № 4: 45-54. (in Russ.)

7. Banks C.M. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains, John Wiley and Sons, Hoboken NJ, 2010: 1-24.

8. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // J. American Instit. Planners. 1956. V. 22: 94 – 102.
9. de Martinis V., Pagliara F., & Wilson A.G. (2014). The evolution and planning of hierarchical transport networks. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 41 (2): 192–210.
10. Dieleman F.M., Dijst M., and Burghouwt G. (2002). "Urban form and travel behavior: micro-level household attributes and residential context." *Urban Studies*, Vol. 39, No. 3: 507–527, DOI: 10.1080/00420980220112801.
11. Ellam L. Stochastic modelling of urban structure / L. Ellam, M. Girolami, G. A. Pavliotis, A. Wilson // 2018 Proc. R. Soc. A 20170700. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2017.0700>.
12. Goulias K. G., Kitamura R. Recursive model system for trip generation and trip chaining. *Transportation Research Record*. 950300101991, Vol. 1236. pp. 59–66.
13. Hauslbaue A. L. Schade J., Drexler C. E. Extending the theory of planned behavior to predict and nudge toward the subscription to a public transport ticket. *Eur. Transp. Res. Rev.* 14, 5, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00528-3>.
14. Javid M. A. People's behavioral intentions towards public transport in Lahore: Role of situational constraints, mobility restrictions and incentives / M. A. Javid, T. Okamura, F. Nakamura // *KSCE J Civ Eng* 20, 401–410 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12205-015-1123-4>.
15. Li, W Exploring Resident's Daily Activity-Travel Behavior: Activity Pattern, Duration and Competition / W. Li, H. Guan, Y. Han // *KSCE J Civ Eng* 25, 3121–3135 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2013-6>.
16. Matyas M. Opportunities and barriers to multi-modal cities: lessons learned from in-depth interviews about attitudes towards mobility as a service. *Eur. Transp. Res. Rev.* 12, 7 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0395-z>.
17. Feng J. The impacts of household structure on the travel behaviour of seniors and young parents in China. / J. Feng, M. Dijst B. Wissink J. Prillwitz. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 3. pp. 117–126, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.03.008.
18. Modeling of the city transport flows as applied to the Moscow agglomeration / A. S. Aliev, V. I. Shvetsov, A. I. Strel'nikov, Yu. Z. Shershevskii // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66. No 11. P. 1805-1815. DOI 10.1007/s10513-005-0214-y.
19. Agureev I. E. Razvitie teorii makrosistem kak neobhodimoe uslovie povysheniya kachestva transportnogo modelirovaniya [Development of macrosystem theory as a prerequisite for improving the quality of transport modeling]. *Mir transporta*. Moscow. 2020; 2 (Tom 18); 6–20. (In Russ.)
20. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Mathematical Model of Transport Behaviour Based on Transport Macrosystems Theory. *World of Transport and Transportation*. 2021; 19 (6): 13-18. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>
21. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Justification of the choice of a theoretical apparatus to describe the transport behavior of city residents (megapolis). *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):746-758. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>
22. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Mathematical Model of Transport Behaviour Based on Transport Macrosystems Theory. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(6):13-18. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>
23. Agureev I. E. Nelinejnye modeli transportnyh sistem [Non-linear models of transport systems]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. Orel: GTU, 2009; 2: 3-16. (In Russ.)
24. Banerjee A. Understanding activity engagement and time use patterns in a developing country context, Doctoral dissertation, University of South Florida, 2006.
25. Zedgenizov A. V. Assessment of the impact of capital construction on the adjacent street-road network with traffic at unregulated intersections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroy-meh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 sentjabrja 2019 goda. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012066. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012066. EDN AMGLHB.
26. Zeng M., LingZ., Zhang B. Stochastic route choice models based on VMS information and hierarchy for urban transport network. *KSCE J Civ Eng* 22, 850–858, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0107-y>.
27. Zedgenizov A. Seliangin V. K., Efremenko I. Methodology for assessing required area for allocating centers of mass attraction in layout of urbanized territories and their impact on quality of traffic management in adjacent street and road network. *Transportation Research Procedia*. 14. Ser. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. S. 743-748.
28. Solodkiy A. I., Chernikh N. V., Improving the level of traffic service on the road network of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroy-meh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 sentjabrja 2019 goda. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012044. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012044. EDN MLKKA.
29. Tyrinopoulos Y., Antoniou C. Factors affecting modal choice in urban mobility. *Eur. Transp. Res. Rev.* 5, 27–39, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0088-3>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Агуреев И. Е. Формулировка задач исследования, научные положения.

Ахромешин А. В. Оформление, поиск и подбор источников литературы. Обзор классификаций УДС, анализ исследований отечественных и зарубежных авторов.

Пышный В. А. Обзор классификаций ЦМТ, анализ исследований отечественных и зарубежных авторов.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Igor E. Agureev. Statement of research objectives, scientific provisions.

Andrey V. Akhromeshin. Design, search and selection of literature sources. Review of UDS classifications, analysis of research by domestic and foreign authors.

Vladislav A. Pyshnyi. A review of the classifications of ITC, an analysis of the research of domestic and foreign authors.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство», SPIN-код: 1910-6751.

Ахромешин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Пышный Владислав Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство», SPIN-код: 9454-4966.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor E. Agureev – Dr of Sci., Associate Professor, Head of the of the Motor Transport and Motor Industry Department, SPIN-код: 1910-6751.

Andrey V. Akhromeshin – Cand. of Sci., Associate Professor, the Motor Transport and Motor Industry Department.

Vladislav A. Pyshnyi – Cand. of Sci., Associate Professor, the Motor Transport and Motor Industry Department, SPIN-код: 9454-4966.

Научная статья

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-76-91>

EDN: GLTLCK



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЗАТРАТ НА ЗАПРАВКУ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ КАТЕГОРИИ N1

М. В. Банкет, Д. В. Шаповал, И. А. Эйхлер*, Д. С. Алешков, И. В. Погуляева
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

mikhail_banket@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1901-8150>

dsh.omsk@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3286-6795>

vaniaeichler@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4681-8468>

denisaleshkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4204-7221>

pogulyaeva_iv@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1109-5327>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Снижение эксплуатационных затрат на моторное топливо для автомобилей возможно путём применения более дешёвых и в то же время менее вредных для экологии альтернативных источников энергии. Основной проблемой использования данных источников энергии, особенно для автомобилей категории N1, является недостаточно развитая инфраструктура сети заправочных станций для альтернативного топлива. Основным альтернативным видом моторного топлива в Российской Федерации является природный газ. Использование сжатого природного газа в качестве моторного топлива на автомобилях категории N1 значительно увеличивает нулевые пробеги из-за удалённости заправочных станций, что снижает эффективность применения природного газа. Целью исследований является разработка методики расчёта затрат на заправку различными видами моторного топлива для автомобилей категории N1 с учетом расположения мест заправки (АЗС/АГЗС/АГНКС).

Материалы и методы. В исследованиях представлена методика расчёта затрат на заправку различными видами моторного топлива, разработанная на основе многофакторного анализа эксплуатационных характеристик автомобиля, заданного маршрута движения автомобиля категории N1, особенностей работы водителя на маршруте и имеющейся инфраструктуры сети заправочных станций. Научной новизной является установление зависимости затрат на заправку моторным топливом от вида используемого топлива, имеющейся инфраструктуры сети заправочных станций, среднесуточного пробега и от технико-экономических показателей автомобилей категории N1.

Результаты. Разработанная методика апробирована на предприятиях, осуществляющих перевозку грузов автомобилями категории N1 на территории г. Омска. Установлено, что для автомобилей категории N1 при осуществлении процесса перевозок грузов в г. Омске затраты на заправку моторным топливом составят от 1,77 до 15,62% от средних затрат на движение по маршруту.

Обсуждение и заключение. Методика позволяет определить влияние используемого топлива на эксплуатационные затраты автомобилей категории N1 для выбора эффективного моторного топлива, а также осуществлять учёт затрат на заправку моторным топливом и более точно осуществлять определение себестоимости перевозки грузов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сжатый природный газ, бензин, сжиженный углеродный газ, заправочная станция, затраты на заправку моторным топливом, автомобили категории N1, инфраструктура сети заправочных станций, себестоимость перевозок грузов, среднесуточный пробег

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 28.12.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Банкет М. В., Шаповал Д. В., Эйхлер И. А., Алешков Д. С., Погуляева И. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Банкет М. В., Шаповал Д. В., Эйхлер И. А., Алешков Д. С., Погуляева И. В. Разработка методики расчёта затрат на заправку различными видами моторного топлива для автомобилей категории N1 // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 76-91. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-76-91>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-76-91>

EDN: GLTLCK

COST CALCULATION METHOD DEVELOPMENT FOR VARIOUS TYPES OF ENGINE FUEL FILLING FOR FIRST CATEGORY AUTOMOBILES

Mikhail V. Banket, Dmitrii V. Shapoval, Ivan A. Eychler*, Denis S. Aleshkov, Irina V. Pogulyaeva

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

mikhail_banket@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1901-8150>

dsh.omsk@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3286-6795>

vaniaeichler@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4681-8468>

denisaleshkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4204-7221>

pogulyaeva_iv@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1109-5327>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Reducing the operating costs of motor fuel for cars is possible through the use of cheaper and at the same time less environmentally harmful alternative energy sources. The main problem with the use of these energy sources, especially for 1 category cars, is the underdeveloped infrastructure of the network of filling stations for alternative fuels. The main alternative type of motor fuel in the Russian Federation is natural gas. The use of compressed natural gas as a vehicle fuel on 1 category cars significantly increases zero mileage due to the remoteness of filling stations, which reduces the efficiency of using natural gas. The purpose of the research is to develop a methodology for calculating the cost of refueling with various types of motor fuel for 1 category cars, taking into account the location of refueling points (gas stations / gas filling stations / filling stations).

Materials and Methods. The research presents a methodology for calculating the cost of refueling with various types of motor fuel, developed on the basis of a multivariate analysis of the vehicle performance, a given 1 category cars route, the driver's work on the route, and the existing infrastructure of the filling station network. The scientific novelty is the establishment of the dependence of the cost of refueling with motor fuel on the type of fuel used, the existing infrastructure of the network of filling stations, the average daily mileage and on the technical and economic indicators of 1 category cars.

Results. The developed methodology was tested at the enterprises that 1 category cars cargoes in the territory of Omsk. It has been established that for 1 category cars, when carrying out the process of transporting goods in Omsk, the cost of refueling with motor fuel will be from 1.77 to 15.62% of the average cost movement by the route.

Discussion and conclusions. The methodology allows to determine the impact of the fuel used on the 1 category cars operating costs, to select an effective motor fuel, as well as to account for the cost of refueling with motor fuel and more accurately determine the cost of transporting goods.

KEYWORDS: compressed natural gas, gasoline, liquefied carbon gas, filling station, motor fuel refueling costs, 1 category cars, filling station network infrastructure, freight transportation cost, average daily mileage.

The article was submitted 24.11.2022; approved after reviewing 28.12.2022; accepted for publication 20.02.2023.

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: Banket M. V., Shapoval D. V., Eychler I. A., Aleshkov D. S., Pogulyaeva I. V. Cost calculation method development for various types of engine fuel filling for first category automobiles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 76-91. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-76-91>

© Banket M. V., Shapoval D. V., Eychler I. A., Aleshkov D. S., Pogulyaeva I. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Грузовые автомобильные перевозки в городах осуществляются в большей степени колесными транспортными средствами малой тоннажности (автомобилями категории N1). Во время выполнения транспортной работы возникают неопределенности, влияющие на общие затраты предприятия и региона в целом [1, 2]. К таким неопределенностям относится ряд факторов, одним из которых является изменяющаяся инфраструктура сети заправочных станций. Авторы в работе [3] предлагают методику многокритериального выбора автотранспорта в зависимости от имеющейся инфраструктуры транспортной сети. Авторами научных исследований [4] предложен алгоритм выбора грузовых транспортных средств в зависимости от конкретных условий на автотранспортном предприятии.

В научных исследованиях [5] рассмотрен вопрос повышения эффективности грузовых автомобильных перевозок в городах за счет разработки метода двухфакторного анализа работы автомобилей, но без учета выбора подвижного состава. В работе [6] представлена методика оценки эффективности применения грузовых автомобилей при перевозке грузов в городах.

Следует отметить, что на оценки эффективности перевозочного процесса также влияет стремление к нулевым выбросам [7]. В работах [8, 9, 10, 11] авторами дана оценка эффективности транспорта с точки зрения экологических показателей. Как отмечают авторы в работе [12], экологически чистые транспортные средства позволяют решить проблему маршрутизации транспортных средств. Согласно оценке степени воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду, выполненной авторами в работе [13], установлено, что рост мировых выбросов вредных веществ вызван ростом автопарка, работающего на топливе нефтяного происхождения. Подробный литературный анализ использования различных видов альтернативного топлива для автомобильного транспорта представлен в работах [14, 15].

Основными проблемами, ограничивающими использование альтернативных источников энергии на автомобильном транспорте, является недостаточно развитая структура

сети заправочных станций. Сеть автомобильных заправочных станций (АЗС), где заправка осуществляется бензином и дизельным топливом, развита достаточно хорошо. Сеть автомобильных газовых заправочных станций (АГЗС) в большинстве регионов России развита практически так же, как и сеть АЗС [16]. Так, например, в г. Омске, по данным электронных справочников международной картографической компании 2GIS, существует более 96 АГЗС во всех частях города. И при правильно выбранном маршруте (проходящем через АГЗС) можно осуществить заправку в процессе перевозки груза. При этом время самой заправки жидким топливом для малотоннажных автомобилей составит от 5 до 15 мин (без учета очереди) в зависимости от наполняемого объема. А вот использование самого дешевого моторного топлива из доступных, а именно компримированного природного газа (КПГ), не всегда позволит добиться максимального экономического эффекта перевозочного процесса, несмотря на все его преимущества [17, 18]. Это обусловлено недостаточно развитой инфраструктурой автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) [19, 20, 21, 22]. Например, в г. Омске работают четыре АГНКС, а количество зарегистрированных автомобилей, использующих в качестве топлива КПГ – 186 единиц. (Форма №1-БДД)¹. При этом в работе [23] предложена методика рационального планирования заправочных станций для стимулирования роста АТС на КПГ.

Помимо природного газа во всем мире в качестве альтернативы нефтяному моторному топливу применяют электроэнергию. Однако использование электричества в качестве топлива для автомобилей категории N1 затруднено высокой стоимостью самих транспортных средств [24], низким запасом хода [25] и низким уровнем развития инфраструктуры для зарядки [26, 27].

Еще одной проблемой использования электромобилей является получение электроэнергии [28], которая вырабатывается, в том числе за счет сжигания углеводородов. Хотя при этом наблюдается рост спроса на покупку электромобилей и их комплектующих [29, 30]. По данным источников [31, 32], в ряде городов РФ, например, Москве, Санкт-Петербурге, Тюмени и др., активно развивается инфраструктура и данный вид транспорта. Но в подавляющем

¹ Форма №1-БДД. Раздел 3. Количество автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов к ним, стоящих на учете. // Показатели состояния безопасности дорожного движения. УГИБДД УМВД России. URL: <http://stat.gibdd.ru/>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения: 28.11.2022). Текст: электронный.

большинстве городов России на сегодняшний день использование электротранспорта не представляется возможным, что отражено в работах [33, 34].

Исходя из вышесказанного, в настоящих исследованиях в качестве моторного топлива рассматриваются следующие виды: дизельное топливо, бензин, сжиженный нефтяной газ (СУГ) и КПГ.

Авторами [35] разработан метод оптимизации затрат на топливо при осуществлении международных автомобильных грузовых перевозок, основанный на оценке расстояния до заправочной станции и стоимости топлива. Однако предложенный метод не позволяет сравнить эффективность использования различных видов моторного топлива с учетом неравномерности развития городской сети заправочных станций.

Согласно [36, 37, 38] у каждого автомобиля категории N1 в зависимости от обслуживаемых районов города по заданию может быть различный среднесуточный пробег. Запас хода зависит от определенного расхода моторного топлива и объема моторного топлива в топливном баке (баллоне). В свою очередь определение расхода i -го вида топлива на 100 км представлено в методике², оценка затрат на заправку подвижного состава описана в [39], а экономический эффект от применения различных видов моторного топлива в [40].

Однако в существующих теоретических положениях и методиках отсутствует учет времени и пробега на заправку моторным топливом, поскольку при перевозке грузов используется подвижной состав на традиционных видах моторного топлива нефтяного происхождения (бензин, дизельное топливо, сжиженный нефтяной газ), а инфраструктура таких заправочных станций широко развита. При этом учетом времени и пробега на заправку моторным топливом в большинстве случаев пренебрегают, поскольку эту операцию осуществляют параллельно перевозочному процессу по возвращению на предприятие или при выходе на линию. С развитием альтернативных видов моторного топлива возникает проблема увеличения неучтенных затрат, связанных с процессом заправки моторным топливом ввиду ограниченной сети заправочных станций

для данного топлива. При этом отсутствуют методики, позволяющие оценить затраты на заправку моторным топливом.

Гипотеза исследования заключается в том, что отсутствие учета затрат на заправку моторным топливом ведет к несоответствию плановых и фактических показателей затрат на перевозку грузов и не позволяет получить объективную оценку общей себестоимости перевозок.

Целью данных исследований является разработка методики расчета затрат на заправку различными видами моторного топлива для автомобилей категории N1 с учетом расположения мест заправки (АЗС/АГЗС/АГНКС). Для достижения которой решалась задача сопоставления средних затрат на заправку моторным топливом и средних затрат на движение транспортного средства по маршруту с учетом применения разных видов моторного топлива.

Проведя анализ литературных источников, установили, что отсутствуют теоретические положения, адекватно отражающие практику. Это приводит к принятию необоснованных решений при перевозке грузов автомобилями категории N1 в условиях удаленности заправочных станций. Для решения данной проблемы впервые в рамках теории грузовых перевозок и эксплуатации автомобилей категории N1 авторами установлена зависимость затрат на заправку моторным топливом от эксплуатационных показателей работы автомобилей категории N1 и развитости инфраструктуры заправочной сети конкретных видов моторного топлива. На основе установленной зависимости разработана методика расчета затрат на заправку различными видами моторного топлива для автомобилей категории N1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ограничения и выборка

Автомобили категории N1 в качестве моторного топлива в настоящее время используют бензин, дизельное топливо, СУГи компримированный природный газ, при этом 62% всех автомобилей категории N1 в РФ составляют автомобили преимущественно марки ГАЗ (Газель) различных модификаций. Поэтому для настоящих исследований выбраны именно автомобили марки ГАЗ (Газель)³.

² Трофимов А.В. Нормирование и контроль расхода горюче-смазочных материалов на предприятиях автомобильного транспорта: учебно-методическое пособие / А. В. Трофимов, Б. В. Журавский, Б. С. Трофимов. Омск, 2021. (2-е издание, деривативное). 42 с.

³ Парк транспортных средств в Российской Федерации // Автостат. Аналитическое агентство. URL: <https://www.autostat.ru/>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения: 28.11.2022). Текст: электронный.

В качестве генеральной совокупности в настоящих исследованиях выбраны предприятия, осуществляющие перевозку грузов автомобилями категории N1 на территории г. Омска.

Автомобили категории N1 в г. Омске используются для перевозки различных грузов и находятся в собственности физических лиц, индивидуальных предпринимателей и различных предприятий. На большинстве предприятий количество применяемых автомобилей составляет не более 10 ед. Однако существует и ряд крупных предприятий, к которым можно отнести ООО «Хлебопродукт» (Форнакс) и ОАО «Хлебодар», осуществляющие производство и перевозку хлебобулочных изделий собственным подвижным составом. Доля рынка хлебобулочных изделий в г. Омске у двух рассматриваемых предприятий составляет более 60%: у «Хлебодара» – 38%, у «Форнакса» – 23%.

В качестве объекта исследования выбраны автомобили категории N1 предприятий ООО «Хлебопродукт» (Форнакс) и ОАО «Хлебодар», осуществляющих перевозку хлебобулочных изделий в г. Омске, в количестве 40 и 60 ед. соответственно.

Поскольку автомобили исследуемых предприятий не используют дизельное топливо, данный вид топлива не будет отражен в настоящих исследованиях.

Для определения дальнейших расчетов были приняты следующие допущения:

- рассматриваются только внутригородские перевозки;
- учитываются только действующие АЗС/АГЗС/АГНКС;
- количество дней работы предприятия постоянно в течение года;
- объём топливного бака/баллонов ограничен конструктивными особенностями автомобилей категории N1 и является постоянной величиной;
- заправка подвижного состава осуществляется на заправочных станциях, находящихся максимально близко к исследуемым предприятиям или местам разгрузки;

- заправка бензином и КПГ происходит в конце смены по пути следования автомобиля на предприятие, согласно руководству по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе⁴, заправка СУГ осуществляется в начале смены при движении автомобиля категории N1 к первому пункту разгрузки, согласно руководству по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на сжиженном нефтяном газе⁵ и технике безопасности при эксплуатации газобаллонных автомобилей;

- часовая тарифная ставка водителя, расход моторного топлива и стоимость конкретного вида топлива рассчитывается путем усреднения данных в течение года.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

Определение стоимости одного километра пробега для грузовых автомобилей

Оценка затрат на заправку различными видами моторного топлива при перевозке грузов автомобилями категории N1 определяется согласно разработанной методике. Методика включает в себя математические модели и зависимости, представленные ниже.

Для оценки экономической эффективности использования того или иного вида топлива произведем расчет значения стоимости одного километра пробега в зависимости от применяемого топлива. Именно данный показатель является одним из основных при оценке целесообразности переоборудования подвижного состава на использование альтернативных видов топлива, а также назначения автомобиля, работающего на том или ином виде моторного топлива на маршруты.

Стоимость одного километра пробега в зависимости от применяемого топлива

$$C_i^{1\text{км}} = \frac{H_i \cdot \Pi_i}{100}, \quad (1)$$

где H_i – расход i -го вида топлива на 100 км, л (м³)/100 км; Π_i – стоимость i -го вида топлива, руб.

⁴ РД 03112194-1095-03 Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034846/titles>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения к ресурсу: 19.12.2022). Текст: электронный.

⁵ РД 03112194-1094-03 Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на сжиженном нефтяном газе // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039627>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения к ресурсу: 19.12.2022). Текст: электронный.

Расход i -го вида топлива на 100 км получен на основе методики⁶ и определен усредненным показателем за год, стоимость i -го вида топлива определена усредненным показателем за год для всех АЗС/АГЗС/АГНКС г. Омска на основании показателя «Средние потребительские цены (тарифы) на товары и услуги» (ЕМИСС)⁷.

Результаты расчета по формуле (1) представлены в таблице 1.

Таблица 1
Средняя стоимость одного километра пробега ГАЗ-172412 в зависимости от применяемого вида топлива, руб.

Источник: составлено авторами.

Table 1
The average cost of one kilometer of GAZ-172412 run depending on the type of fuel used, rub.

Source: compiled by the authors.

Показатель	Значения		
Вид топлива	Бензин АИ-92	СУГ	КПГ
Стоимость 1 км пробега, руб.	7,84	4,33	3,61

Из анализа полученных результатов следует, что наиболее эффективным видом топлива с точки зрения затрат на топливо для осуществления процесса перевозки автомобилями марки ГАЗ является КПГ, однако они не учитывают величину пробега на заправку моторным топливом, которая будет варьироваться в зависимости от месторасположения заправочных станций и необходимости в заправках топливом.

Определение годового пробега грузовых автомобилей в зависимости от вида используемого топлива

При этом годовой пробег грузовых автомобилей категории N1, работающих на различных видах моторного топлива, будет различен, поскольку помимо пробега на выполнение транспортной работы, годовой пробег будет учитывать пробеги до заправки моторным топливом. Также стоит заметить, что чем больше объем топливных баков и, соответственно, моторного топлива на борту автомобиля, тем больше запас хода и тем реже возникает не-

обходимость в заправке моторным топливом.

Запас хода автомобиля категории N1 для i -го вида моторного топлива определяется по формуле

$$l_{3X}^i = \frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i}, \quad (2)$$

где Q_T^i – объем топлива в топливном баке/баллонах, л (м³).

При выполнении перевозки грузов необходимо учитывать остаток моторного топлива в баке/баллоне для возможности своевременного его пополнения.

Данный остаток моторного топлива зависит от расстояния до места заправки, то есть удаленности автомобиля категории N1 от заправочной станции.

Определим запас хода до момента осуществления заправки i -м видом моторного топлива:

$$l_{3X}^i = \frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_z^i, \quad (3)$$

где l_z^i – расстояние от последнего места разгрузки до АЗС/АГНКС или расстояние от предприятия до АГЗС, км.

Заправка моторным топливом может осуществляться не каждый день, поскольку при малых среднесуточных пробегах остаток моторного топлива может быть достаточен для выполнения транспортной работы на следующий рабочий день.

Определим количество дней без дозаправки i -м видом моторного топлива:

$$D_{\text{бз}}^i = \frac{1}{l_{\text{cc}}} \cdot \left(\frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_z^i \right), \quad (4)$$

где l_{cc} – среднесуточный пробег (без учета пробега на заправку моторным топливом), км.

Тогда необходимое количество заправок i -м видом моторного топлива за год для одного автомобиля категории N1 примет вид

⁶ Трофимов А.В. Нормирование и контроль расхода горюче-смазочных материалов на предприятиях автомобильного транспорта: учебно-методическое пособие / А.В. Трофимов, Б.В. Журавский, Б. С. Трофимов. Омск, 2021. (2-е издание, переработанное). 42 с.

⁷ Показатель «Средние потребительские цены (тарифы) на товары и услуги» // ЕМИСС. Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31448>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения к ресурсу: 28.11.2022). Текст: электронный.

$$N_3^i = \frac{D_p}{\frac{1}{l_{cc}} \cdot \left(\frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_3^i \right)}. \quad (5)$$

На основе полученных математических моделей можно определить годовой пробег автомобиля на i -м виде моторного топлива в зависимости от среднесуточного пробега с учетом пробега до заправочных станций и количестве заливок моторным топливом в год.

Годовой пробег автомобиля категории N1 на i -м виде моторного топлива определяется по формуле

$$L_G^i = l_{cc} \cdot D_p + \frac{D_p \cdot l_3^i}{\frac{1}{l_{cc}} \cdot \left(\frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_3^i \right)}. \quad (6)$$

Таким образом, полученная математическая модель является функцией для двух варьируемых параметров среднесуточного пробега и расстояния от последнего места разгрузки до АЗС/АГНКС или расстояние от предприятия до АГЗС (в зависимости от вида используемого топлива).

Тогда годовой среднесуточный пробег примет вид

$$\bar{l}_{cc}^{Gi} = \frac{L_G^i}{D_p} = l_{cc} + \frac{l_3^i}{\frac{1}{l_{cc}} \cdot \left(\frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_3^i \right)}. \quad (7)$$

Годовой среднесуточный пробег на заправку моторным топливом определяется по формуле

$$\bar{l}_{cc(3)}^{Gi} = \frac{l_3^i}{\frac{1}{l_{cc}} \cdot \left(\frac{Q_T^i \cdot 100}{H_i} - l_3^i \right)}. \quad (8)$$

Результаты вычислений по формуле (8) для исследуемых предприятий при значениях среднесуточного пробега, которые варьируются от 50 до 250 км, и удалённости заправочных станций от выполняемого автомобилем маршрута от 300 м до 25 км для разных видов моторного топлива, представлены на рисунке 1.

Среднесуточный пробег определен на основе обработки маршрутных листов за год по предприятиям ОАО «Хлебодар» и ООО «Хлебопродукт». Рабочие дни – на основе обработки данных этих маршрутных листов.

Расстояние от последнего места разгрузки до АЗС/АГНКС и расстояние от предприятия до АГЗС определено по ГИС-картам, на основе протяженности дорожной сети⁸, с учетом количества и месторасположения заправочных станций АЗС/АГЗС/АГНКС. Количество и месторасположения соответствующих станций определялось на основании данных портала Benzin-price.ru⁹.

С ростом среднесуточного пробега пропорционально увеличивается и количество заправок топливом, однако в зависимости от вида используемого топлива, месторасположения предприятия и маршрута движения транспортного средства пробег до места заправки будет различным, поскольку инфраструктура заправочных станций развита неравномерно.

За минимальное удаление заправочных станций и связанных с этим пробегами автотранспортных средств был принят пробег по территории станций, при этом сама станция находится на маршруте автотранспортного средства (среднее расстояние движения по территории заправочных станций определялось с помощью измерений на ГИС-картах и определении среднего пробега АТС). За максимальное удаление заправочных станций в настоящих исследованиях было принято среднее расстояние от территории предприятий до ближайшей станции, при этом рассматривалось, что кратчайшее расстояние находится на маршруте – последний пункт разгрузки (первый пункт загрузки) – «предприятие – заправочная станция». В этом случае пробег автотранспортного средства на заправку моторным топливом составит две длины маршрута «предприятие – заправочная станция».

С учетом вышеизложенных допущений и оценки состояния существующей инфраструктуры наименьшей вариативностью обладает бензиновое топливо – при его использования максимальные годовые среднесуточные пробеги составят 3 км.

⁸ Программы комплексного развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации // Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет : официальный сайт / ФГБОУ ВО «СибАДИ» / URL <https://sibadi.org/proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-dooogi/oms-kaya-gorodskaya-aglomeratsiya/> (дата обращения: 17.11.2022). Текст: электронный.

⁹ АЗС в Омской области, заправки Омской области : официальный сайт / national oceanic and atmospheric administration / - URL <https://www.benzin-price.ru/> (дата обращения: 17.11.2021). Текст: электронный.

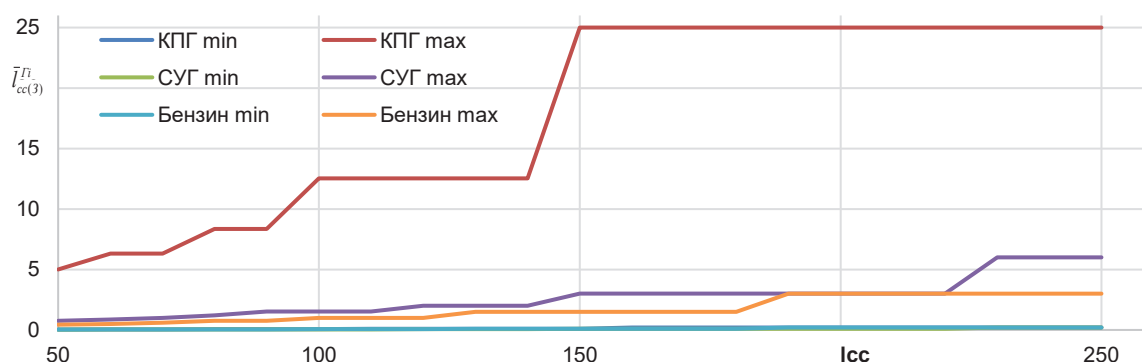


Рисунок 1 – Годовой среднесуточный пробег на заправку моторным топливом в зависимости от вида топлива
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Annual average daily mileage for refueling with motor fuel depending on the type of fuel
Source: compiled by the authors.

Что обусловлено достаточно большой распространенностью данных заправочных станций. Наибольшими годовыми среднесуточными пробегами в нашем исследовании обладает сжатый природный газ, что связано с отсутствием достаточной инфраструктуры и большей удаленностью заправочных станций данного вида от месторасположения предприятий. Следует отметить, что для дальнейших исследований будут рассмотрены варианты с максимальным годовым среднесуточным пробегом автотранспортных средств.

Установленные зависимости являются базовыми элементами разработанной модели, поскольку лежат в основе определения затрат на заправку различными видами моторного топлива при перевозке грузов автомобилями категории N1.

Определение затрат на заправку моторным топливом автомобилей категории N1

Затраты на заправку моторным топливом, руб. [39]:

$$Z_3 = \sum_{i=1}^m Z_i, \quad (9)$$

где m – конечное значение при учете всех переменных, $m = 3$.

Затраты на пробег от места стоянки автомобиля до места заправки и от места заправки до первого пункта разгрузки, руб.:

$$Z_1 = l_3 \cdot C_i^{l_{km}}, \quad (10)$$

где l_3 – расстояние от места стоянки автомобиля до места заправки и от места заправки до первого пункта разгрузки, км.

Затраты на оплату труда водителя за время движения транспортного средства от места стоянки автомобиля категории N1 до места заправки и от места заправки до первого пункта разгрузки, руб.:

$$Z_2 = \frac{l_3 \cdot C_{mч}}{V_m}, \quad (11)$$

где V_m – средняя техническая скорость, км/ч; $C_{mч}$ – часовая тарифная ставка водителя, руб./ч,

Значения средней технической скорости определены по данным системы ГЛОНАСС.

Затраты на оплату труда водителя за время наполнения топливного бака (газового баллона) моторным топливом:

$$Z_3 = t_{зап} \cdot C_{мч}, \quad (12)$$

где $t_{зап}$ – время заправки одного автомобиля, ч.

Время заправки одного автомобиля определено для каждого вида моторного топлива и объема топливного бака (газового баллона), а также остатка моторного топлива в топливном баке (газовом баллоне), данные результаты получены авторами методом хронометрирования с учетом правил проведения натурных наблюдений.

Конкретное значение затрат на заправку моторным топливом можно определить для конкретного анализируемого случая, зная конкретные величины параметров. Однако при планировании перевозочного процесса определить значения некоторых переменных можно только с какой-то долей вероятности, поэтому предлагается использовать средние затраты на заправку моторным топливом с учетом переменных $V_m, t_{зап}$.

Затраты на пробег от места стоянки автомобиля категории N1 до места заправки и от места заправки до первого пункта разгрузки (Z_1) не включают в себя переменных, и поэтому данная величина затрат будет определена произведением величин, входящих в расчетную формулу.

Исходя из вышесказанного, средние затраты на заправку моторным топливом определяются:

$$\bar{Z}_3 = Z_1 + \sum_{i=1}^{m-1} Z_i, \quad (13)$$

где Z_i – среднеарифметическое значение затрат при определенных переменных;

Z_1 – среднеарифметическое значение затрат при переменной V_m и $t_{\text{запр}} = \text{const}$;

Z_2 – среднеарифметическое значение затрат при переменной $V_m = \text{const}$ и $t_{\text{запр}}$;

Z_3 – среднеарифметическое значение затрат при переменных V_m и $t_{\text{запр}}$.

Среднеарифметические значения затрат при переменных V_m и $t_{\text{запр}}$ рассчитываются по формуле

$$Z_i = \frac{Z_{2i} + Z_{3i} + (Z_2 + Z_3)_i}{3}. \quad (14)$$

При изменении двух переменных от минимальных до максимальных значений можно провести не более трех расчетов.

Результаты расчета средних затрат на заправку моторным топливом для одной единицы подвижного состава исследуемых предприятий представлены в таблице 2. Результаты представлены с учетом разовой заправки моторным топливом.

Расчеты проведены с учетом имеющейся

инфраструктуры заправочных станций. Для бензина

($Z_{3Б}$) и СУГ ($\bar{Z}_{3СУГ}$) расчет проводился для ближайших заправочных станций, расчет для КПГ

($Z_{3КПГ}$) проводился для двух имеющихся АГНКС.

Анализ результатов расчета средних затрат на заправку моторным топливом позволил сделать вывод о том, что для ООО «Хлебопродукт» (Форнакс) и для ОАО «Хлебодар» заправку КПГ целесообразно осуществлять на АГНКС по улице Заводская, 17/1а. Поэтому в дальнейших исследованиях будем учитывать данную АГНКС, поскольку именно по ней получены минимальные затраты на заправку моторным топливом.

Полученные данные средних затрат на заправку различными видами моторного топлива необходимо сопоставить со средними затратами на движение автомобилей категории N1 по маршруту.

Определение затрат на движение по маршруту автомобиля категории N1

Средние затраты на движение автомобиля по маршруту включают в себя эксплуатационные затраты на топливо и средние затраты на оплату труда водителя за время движения автомобиля категории N1 по маршруту.

$$\bar{Z}_0 = Z_m + \bar{Z}_{\text{он}}. \quad (15)$$

Эксплуатационные затраты на топливо для одного автомобиля за сутки определяются следующим образом:

$$Z_m = l_{cc} \cdot C_i^{1км}. \quad (16)$$

Таблица 2

Средние затраты на заправку моторным топливом в зависимости от применяемого топлива (на одну заправку)

Источник: составлено авторами.

Table 2

Average costs for refueling with motor fuel depending on the fuel used (per refueling)

Source: compiled by the authors.

Вид топлива	Средние затраты на заправку моторным топливом, руб.	
	ООО «Хлебопродукт» (Форнакс)	ОАО «Хлебодар»
Бензин АИ-92	123,5	116,4
СУГ	152,4	145,4
КПГ АГНКС № 1 – ул. Заводская, 17/1а	762,8	370,5
КПГ АГНКС № 2 – ул. Долинная, 11	817,0	627,6

Таблица 3
Средние затраты на движение автомобиля категории N1 по маршруту в зависимости от среднесуточного пробега для разных видов моторного топлива (за сутки)
Источник: составлено авторами.

Table 3
Average costs for 1 category cars movement along the route depending on the average daily mileage for different types of motor fuel (per day)
Source: compiled by the authors.

Среднесуточный пробег, км.	Затраты для различных видов моторного топлива, руб.		
	Бензин АИ-92 ($\bar{Z}_{об}$)	СУГ ($\bar{Z}_{суг}$)	КПГ ($\bar{Z}_{кпг}$)
50	889,8	875,8	677,8
100	1778,6	1751,6	1353,6
150	2668,4	2627,4	2030,4
200	3557,2	3503,2	2706,2
250	4447,0	4379,0	3383,0

Затраты на оплату труда водителя за время движения автомобиля по маршруту:

$$Z_{on} = \frac{l_{cc} \cdot C_{мч}}{V_m}. \quad (17)$$

Средние затраты на оплату труда водителя за время движения автомобиля категории N1 по маршруту определяются как среднеарифметическое значение затрат при переменной V_m .

Результаты расчета средних затрат на движение автомобиля по маршруту в зависимости от среднесуточного пробега для разных видов моторного топлива (за сутки) представлены в таблице 3.

Следует отметить, что результаты расчета средних затрат на движение автомобиля категории N1 по маршруту в зависимости от среднесуточного пробега для разных видов моторного топлива получены без учета затрат на заправку моторным топливом. Поэтому данные значения затрат для исследуемых предприятий одинаковы. Результирующими средними затратами на движение автомобиля будет сумма средних затрат на движение автомобиля по маршруту и средних затрат на заправку моторным топливом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление затрат на заправку различными видами моторного топлива и на движение по маршруту автомобиля категории N1

Произведем сопоставление средних затрат на заправку различными видами моторного топлива и средних затрат на движение автомобиля по маршруту относительно среднесуточного пробега для исследуемых предприятий. Данное сопоставление можно выполнить для любого среднесуточного пробега, в качестве примера выбран $l_{cc} = 100$ км (рисунки 2, 3). Годовые пробеги для автомобилей при разных видах используемого топлива определены по формуле (6).

Произведя оценку и обработку результатов сопоставления, установили, что неучтенные затраты, которые возникают в процессе перевозки грузов, связаны с необходимостью заправки моторным топливом.

Оценка затрат на заправку различными видами моторного топлива для исследуемых предприятий

Согласно разработанной методике расчета затрат на заправку различными видами моторного топлива при перевозке грузов автомобилями категории N1 произведен расчет для исследуемых предприятий. Расчет произведен для одного автомобиля за год при $l_{cc} \in [10; \infty)$ составят:

Для ООО «Хлебопродукт» (Форнакс):

- при использовании бензина: от 1358,6 руб. до 31124,3 руб., что составляет 1,88–2,04% от средних затрат на движение автомобиля;

- при использовании СУГ: от 1371,9 руб. до 31248,2 руб., что составляет 1,91–2,1% от средних затрат на движение автомобиля;

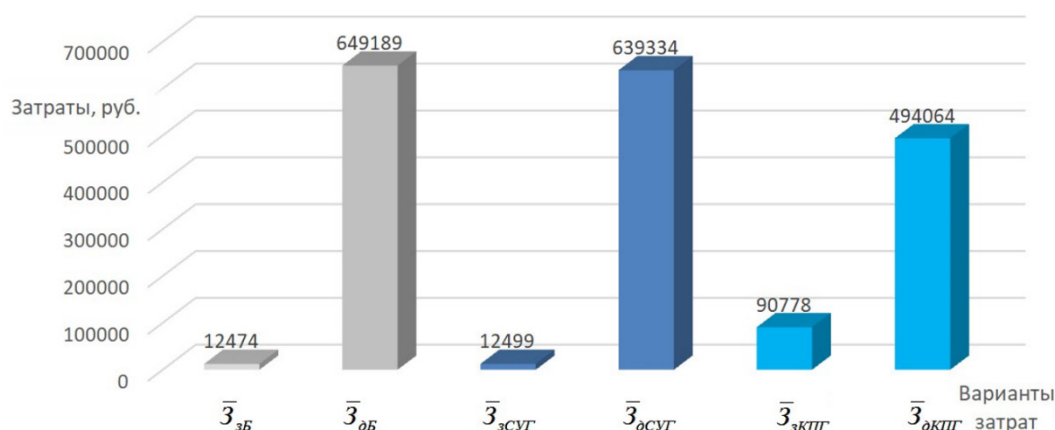


Рисунок 2 – Сопоставление средних затрат на заправку различными видами моторного топлива и средних затрат на движение автомобилей категории N1 по маршруту при $l_{cc} = 100$ км для ООО «Хлебопродукт» (Форнакс) за год
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Comparison of the average costs for refueling with various types of motor fuel and the average costs for 1 category cars movement along the route with $l_{cc} = 100$ km for OOO Khleboprodukt (Fornaks) for the year
Source: compiled by the authors.

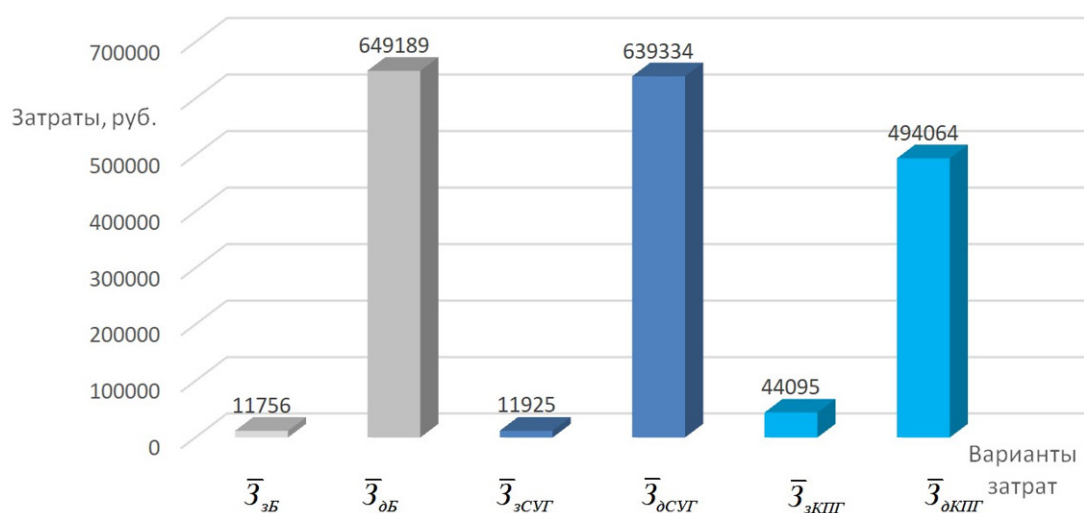


Рисунок 3 – Сопоставление средних затрат на заправку различными видами моторного топлива и средних затрат на движение автомобилей категории N1 по маршруту при $l_{cc} = 100$ км для ОАО «Хлебодар» за год
Источник: составлено авторами.

Fig. 3 – Comparison of the average cost of refueling with various types of motor fuel and the average cost of 1 category cars movement along the route at $l_{cc} = 100$ km for ОАО Khlebodar for the year
Source: compiled by the authors.

• при использовании КПГ: от 9154,1 руб. до 225801,1 руб., что составляет 15,43–15,62% от средних затрат на движение автомобиля.

Для ОАО «Хлебодар»:

• при использовании бензина: от 1280,3 руб. до 29331,6 руб., что составляет

1,77–1,92% от средних затрат на движение автомобиля;

• при использовании СУГ: от 1308,8 руб. до 29811,8 руб., что составляет 1,82–2,01% от средних затрат на движение автомобиля;

• при использовании КПГ: от 4446,5 руб.

до 109681,1 руб., что составляет 8,14 до 8,25% от средних затрат на движение автомобиля.

Следует отметить, что для ОАО «Хлебо-дар» затраты на заправку КПГ более чем в четыре раза выше, чем затраты на заправку бензином и СУГ, а для ООО «Хлебопродукт» (Форнакс) – более чем в семь раз. Это обуславливает обязательный учет затрат на заправку моторным топливом. При принятии решения о переводе подвижного состава на КПГ в настоящее время необходимо учитывать расположение заправочной станции от места стоянки подвижного состава.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили разработать методику расчета затрат на заправку различными видами моторного топлива при перевозке грузов автомобилями категории N1. Методика позволяет определить средние затраты на движение автомобилей категории N1 по маршруту и средние затраты на заправку различными видами моторного топлива. Результаты позволили определить конечные затраты, связанные с заправкой моторным топливом, с учетом среднесуточного пробега исследуемых автомобилей и имеющейся инфраструктуры заправочных станций. Отсутствие планирования данных затрат повлечет за собой финансовые потери и снижение прибыли от услуг перевозки.

Обоснование выбора вида топлива при перевозке грузов автомобильным транспортом необходимо выполнять с учетом затрат на заправку моторным топливом и в зависимости от среднесуточного пробега, что позволяет сделать разработанная методика.

Дальнейшее развитие инфраструктуры использования КПГ на автомобильном транспорте за счет увеличения числа АГНКС будет приводить к снижению затрат на заправку моторным топливом в гиперболической зависимости и, соответственно, общие затраты предприятия на движение автомобилей категории N1 будут уменьшаться, а также росту экономической эффективности использования данного вида моторного топлива, даже при малом значении среднесуточного пробега.

Предложенная авторами настоящих научных исследований методика расчета затрат на заправку различными видами моторного топлива для автомобилей категории N1 позволяет произвести учет всех затрат, возникающих в процессе перевозки для любого предприятия, осуществляющего перевозочный процесс с учетом имеющейся инфраструктуры рассматриваемого региона.

Данная оценка должна осуществляться при принятии решения о закупке автомобилей категории N1 или при переоборудовании автомобилей в газобаллонные.

При определении затрат на топливо предприятий, осуществляющих перевозку, зачастую не учитывают затраты, связанные с заправкой автомобилей категории N1. В существующих методиках планирования перевозочного процесса учитываются нулевые пробеги. Однако в них не выделен пробег на заправку, а отсутствие учета данного показателя при планировании может привести к снижению эффективности перевозок. А при недостаточно развитой инфраструктуре заправочных станций возникают дополнительные затраты, связанные с заправкой моторным топливом. Это особенно актуально для газобаллонных автомобилей, использующих КПГ, поскольку инфраструктура АГНКС находится на этапе развития и зачастую не покрывает охват города.

В настоящих научных исследованиях произведен расчет стоимости одного километра пробега автотранспортного средства в зависимости от применяемого вида топлива. Данный расчет применяется перевозчиками при принятии решения переоборудования автомобилей категории N1 в газобаллонные для осуществления перевозок. Однако этот расчет не позволяет учесть ряд дополнительных затрат, связанных в первую очередь с заправкой автомобиля, что на практике приводит к наличию дополнительных затрат и увеличению срока окупаемости переоборудования автомобилей категории N1 в газобаллонные.

Произведен расчет количества заправок топливом в зависимости от среднесуточного пробега. Результаты расчета позволили сделать вывод, что в зависимости от вместимости топливного бака/газового баллона и среднесуточного пробега количество заправок будет изменяться, оказывая влияние на затраты, связанные с заправкой моторным топливом.

Авторами разработана методика определения средних затрат на заправку моторным топливом, позволяющая перевозчикам осуществлять учет затрат, связанных с заправкой моторным топливом. Эффективность разработанной методики заключается в возможности определения неучтенных затрат, связанных с заправкой моторным топливом и адекватной оценке срока окупаемости исследуемых автомобилей, работающих на различных видах моторного топлива.

Проведено сопоставление средних затрат на заправку моторным топливом и средних за-

трат на движение транспортного средства по маршруту с учетом применения разных видов моторного топлива. Установлено, что с учетом имеющейся инфраструктуры заправочных станций средние затраты на заправку моторным топливом при использовании бензина и СУГ для исследуемых предприятий могут составлять в пределах 2% от средних затрат на движение транспортного средства, а для КПП могут достигать более 15%. Учет данных затрат позволит минимизировать финансовые потери, связанные с перевозочным процессом.

Настоящие научные исследования проведены для автомобилей категории N1 с учетом сложившейся инфраструктуры сети заправочных станций углеводородного топлива. Дальнейшие исследования будут направлены на создание алгоритма оценки затрат на заправку моторным топливом для всех типов автомобильного транспорта с учетом инфраструктуры сети заправочных станций не только углеводородного, но и водородного топлива и электричества. Применение результатов исследования возможно для определения эффективности использования автотранспортных средств, использующих различные виды топлива. Внедрение разработанной методики позволит улучшить планирование затрат при организации перевозок грузов исследуемыми автомобилями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mohamad M. A. I. Ranking the Logistics Uncertainty in Malaysian Road Transport Operations / M.A.I. Mohamad, S.S.R. Shariff, W.M.W. Mohamed // 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). 2020. pp.371-374.
2. Moschovou T. P. Road freight transportation in a period of economic instability: A panel data study in four EU Mediterranean countries. / T.P. Moschovou, A.G. Giannopoulos // Research in Transportation Business & Management. 2021. vol. 41. no. 100622 DOI:10.1016/j.rtbm.2021.100622
3. Stoilova, S. Methodology for Multi-criteria Selection of Transportation Technology in Transport Network / S. Stoilova // Modelling of the interaction of the different vehicles and various transport modes. 2020. pp. 1-103. DOI:10.1007/978-3-030-11512-8_1
4. Коновалова Т. В., Надирян С. Л. Алгоритм выбора подвижного состава для перевозки грузов // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 10. С. 239–242. DOI 10.23672/SAE.2019.10.39019
5. Aytbagina E. Method of Two-Factor Analysis of Cars Operation in the Road Transport System of Cargo Transportation / E. Aytbagina, E. Vitvitskiy // 8th International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia). 2020, vol. 2. pp.968-974. DOI: 10.5937/jaes0-36647
6. Putra, A. A. Model of logistic transport distribution in the urban area / A. A. Putra, L.O.M. Magribi, M. Makmur // 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE). 2020. no. 012098. DOI 10.1088/1755-1315/419/1/012098
7. Enzmann J. Reducing Road Transport Emissions in Europe: Investigating A Demand Side Driven Approach / J. Enzmann, M. Ringel //Sustainability. 2020. vol. 12 (18). no. 7594. DOI: 10.3390/su12187594
8. Ma, Q.F. Green efficiency changes of comprehensive transportation in China: Technological change or technical efficiency change? / Q.F. Ma, P. Jia, H.B. Kuang // Journal of cleaner production. 2021. vol. 304. no. 127115.
9. Munoz-Villamizar, A. Measuring environmental performance of urban freight transport systems: A case study / A. Munoz-Villamizar, J. Santos, J.C. Velazquez-Martinez // Sustainable cities and society. 2020. vol. 52. no. 101844. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101844
10. Palander T. Comparison of Energy Efficiency Indicators of Road Transportation for Modeling Environmental Sustainability in "Green" Circular Industry / T. Palander, H. Haavikko, K. Karha // Sustainability. 2020. vol. 12 (7). no. 2740. DOI: 10.3390/su12072740
11. Safranek, M. Alternative fuels in urban transport / M. Safranek, I. Voznakova // 8th Carpathian Logistics Congress on Logistics, Distribution, Transport and Management (CLC). 2019. pp.861-866.
12. Ghorbani, E. Survey on Environmentally Friendly Vehicle Routing Problem and a Proposal of Its Classification / E. Ghorbani, M. Alinaghian, G.A. Perboli // Sustainability. 2020. vol. 12 (21). pp. 1-72. DOI: 10.3390/su12219079
13. Makarova I. Usage of Microscopic Simulation to Estimate the Environmental Impact of Road Transport / I. Makarova, P. Buyvol, K. Shubenkova // International Scientific Conference on LOGI - Horizons of Autonomous Mobility in Europe. 2020. vol. 44. pp. 86-93.
14. Johnson E. Cars and ground-level ozone: how do fuels compare? / E. Johnson // European Transport Research Review. 2017. vol. 9. no 47 (2017). DOI:10.1007/s12544-017-0263-7
15. Navas-Anguita, Z. A review of techno-economic data for road transportation fuels / Z. Navas-Anguita, D. Garcia-Gusano, D. Iribarren // Renewable & sustainable energy reviews. 2019.pp.11-26. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.041
16. Старинская, Г. Как в России устроен рынок АЗС / Г. Старинская // Ведомости. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/10/13/737707-kak-ustroen-rinok-azs>, свободный. Заглавие с экрана (Дата обращения к ресурсу 20.08.2021).
17. Milojević, S.T. Sustainable application of natural gas as engine fuel in city buses – benefit and restrictions. / S.T. Milojević // Journal of Applied Engineering Science. 2017. vol. 15. no. 1. pp. 81-88. DOI:10.5937/jaes15-12268
18. Tica, S. Study of the fuel efficiency and ecological aspects of CNG buses in urban public transport in Belgrade / S. Tica, P. Živanović, S. Bajčetić, B. Milovanović, A. Nađ // Journal of Applied Engineering Science. 2019. vol. 17. no. 1. pp. 65-73. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-17035>
19. Суворов А. С. Перевод российского автотранспорта на газомоторное топливо осуществляется медленно // АвтоГазоЗаправочныйКом-

плекс+Альтернативное Топливо. 2019. № 12. С. 556–557.

20. Тимирханова Л. Ф., Пельменева А. А. Факторы развития рынка газомоторного топлива в регионах РФ // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 8 (188). С. 37–46.

21. Xie X. The Usage Analysis and Policy Choice of CNG Taxis Based on a Multi-stage Dynamic Game Model. / X. Xie, Y. Wang, X. Li // Computational Economics. Springer; Society for Computational Economics. 2019. vol. 54(4). pp 1379-1390. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10614-016-9645-5>

22. Zhou Y. The current level of development of the Chinese CNG automobile market, its future trends and strategies / Y. Zhou, Z. Zhou // Natural Gas and LNG. 2009. vol.10. pp. 44-48. (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.04.010>

23. Huang K., Prediction of CNG automobile ownership by using the combined model / K. Huang, Y. Lv, C. Huang, Y. Wang, Y. Niu, W. Yang // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. vol. 6. pp. 2422-2427.

24. Ajanovic A. Economic and Environmental Prospects for Battery Electric - and Fuel Cell Vehicles / A. Ajanovic, R. Haas // A Review fuel cells. vol. 19 (5). 2019. pp.515-529. DOI: 10.1002/fuce.201800171

25. Synák F. Assessing the Energy Efficiency of an Electric Car. / F. Synák, M. Kučera, T. Skrúcaný // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. 2021. vol. 23. no. 1. pp. A1-A13. DOI: 10.26552/com.C.2021.1.A1-A13

26. Campana, M. Optimal Sizing of Electric Vehicle Charging Stations Considering Urban Traffic Flow for Smart Cities /M. Campana, E. Inga, J. Cardenas // Energies. 2021. vol. 14 (16). no. 4933. DOI: 10.3390/en14164933

27. Eltoumi F. M. The key issues of electric vehicle charging via hybrid power sources / F. M. Eltoumi, M. Becherif, H.S. Ramadan // Techno-economic viability, analysis, and recommendations, Renewable & sustainable energy reviews. 2021. vol. 138. no. 110534. DOI:10.1016/j.rser.2020.110534

28. Petrovic D.T. Electric cars are they solution to reduce CO2 emission?/ D.T. Petrovic, D.R. Pesic, R.M. Mijailovic // Thermal science. 2020. vol. 24(5). pp.2879-2889. DOI: 10.3390/su14063371

29. Ponsree, K. Environmental Awareness and Adoption Intention of Electric Cars in Young Adult / K. Ponsree, N. Gebombut, P. Naruetharadhol // Modern management based on big data. 2021. pp. 165 -174.

30. Solcan, S. Designing a car seat for electrical car / S. Solcan, R. Rozsos, C. Neamtu // Actatechnicanapocensis series-applied mathematics mechanics and engineering. 2019. vol. 62 (4).pp. 617-622.

31. Новости. КАМАЗ и ГАЗ поставят Москве первые 200 электробусов // АвтоГазоЗаправочный-Комплекс+Альтернативное Топливо. 2018. № 7. 335 с.

32. На линии Москвы вышел 300-й электробус // АвтоГазоЗаправочныйКомплекс+Альтернативное Топливо. 2020. № 3. 152 с.

33. Блудян Н. О. Оценка перспективы использования электрических автобусов на городском транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2020. № 8. С. 28–36.

34. Предпосылки и тенденции развития электромобилей / В. Б. Мошков, В. В. Овчинников, А. Ю. Баранник, Д. В. Черняков, В. В. Кожемякин, М. Ю. Курбатов, А. С. Скоробогатая // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18, № 2 (68). С. 14–19.

35. Fülöp M.T. Economic Development Based on a Mathematical Model: An Optimal Solution Method for the Fuel Supply of International Road Transport Activity / M.T. Fülöp, M. Gubán, G. Kovács, M. Avornicului // Energies. 2021. vol.14. no. 2963. DOI: 10.3390/en14102963

36. Николин В. И. Грузовые автомобильные перевозки: монография / В.И. Николин, Е.Е. Витвицкий, С.М. Мочалин. Изд-во «Вариант-Сибирь», 2004. 480 с.

37. Николин В. И., Мочалин С. М., Погуляева И. В. Оцениваем эффективность // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2005. № 10. С. 36–38.

38. Войтенков С. С., Шаповал Д. В., Витвицкий Е. Е. К вопросу о терминологии на автомобильном транспорте // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 4 (44). С. 11–15.

39. Банкет М. В., Шаповал Д. В., Бакунов А. С. Применение природного газа общественным автобусным транспортом в городе Омске при условии рационального размещения газовых заправочных станций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 3. С. 78–82.

40. Банкет М. В., Шаповал Д. В., Войтенков С. С. Экономическая оценка использования природного газа на коммерческом автомобильном транспорте при перевозке хлеба в г. Омске // Грузовик. 2021. № 12. С. 35–42.

REFERENCES

1. Mohamad M.A.I, Shariff S.S.R., Mohamed W.M.W. Ranking the Logistics Uncertainty in Malaysian Road Transport Operations, *11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. 2020: 371-374.

2. Moschovou T. P., Giannopoulos A. G. Road freight transportation in a period of economic instability: A panel data study in four EU Mediterranean countries. *Research in Transportation Business & Management*. 2021; vol. 41. no. 100622. DOI: 10.1016/j.rtbm.2021.100622

3. Stoilova S. Methodology for Multi-criteria Selection of Transportation Technology in Transport Network Modelling of the interaction of the different vehicles and various transport modes. 2020: 1-103. DOI:10.1007/978-3-030-11512-8_1

4. Konovalova T. V., Nadjirjan S. L. Algoritmy vybora podvzhnogo sostava dlja perevozki gruzov [Algorithm for selection of rolling stock for cargo transportation]. *Gumanitarnye, social'no-jeconomicheskie i obshchestvennyye nauki*. 2019; 10: 239-242. DOI 10.23672/SAE.2019.10.39019 (In Russ.)

5. Aytbagina E., Vitvitskiy E. Method of Two-Factor Analysis of Cars Operation in the Road Transport System of Cargo Transportation, *8th International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia)*. 2020; vol. 2: 968-974. DOI: 10.5937/jaes0-36647

6. Putra A. A., Magribi L. O. M., Makmur M. Model of logistic transport distribution in the urban area, 3rd *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE)*. 2020, no. 012098. DOI 10.1088/1755-1315/419/1/012098
7. Enzmann J., Ringel M. Reducing Road Transport Emissions in Europe: *Investigating A Demand Side Driven Approach, Sustainability*. 2020; 12 (18). no. 7594. DOI: 10.3390/su12187594
8. Ma Q. F., Jia P., Kuang H. B. Green efficiency changes of comprehensive transportation in China: Technological change or technical efficiency change? *Journal of cleaner production*. 2021; vol. 304. no. 127115.
9. Munoz-Villamizar A., Santos, J., Velazquez-Martinez J. C. Measuring environmental performance of urban freight transport systems: A case study, *Sustainable cities and society*. 2020; vol. 52. no. 101844. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101844
10. Palander T., Haavikko H., Karha K. Comparison of Energy Efficiency Indicators of Road Transportation for Modeling Environmental Sustainability in "Green" Circular Industry. *Sustainability*. 2020; vol. 12 (7). no. 2740. DOI: 10.3390/su12072740
11. Safranek M., Voznakova I. Alternative fuels in urban transport, *8th Carpathian Logistics Congress on Logistics, Distribution, Transport and Management (CLC)*. 2019: 861-866.
12. Ghorbani E., Alinaghian M., Perboli G. A. Survey on Environmentally Friendly Vehicle Routing Problem and a Proposal of Its Classification, *Sustainability*. 2020; vol. 12 (21): 1-72. DOI: 10.3390/su12219079
13. Makarova I., Buyvol P., Shubenkova K. Usage of Microscopic Simulation to Estimate the Environmental Impact of Road Transport, *International Scientific Conference on LOGI - Horizons of Autonomous Mobility in Europe*, 2020. vol. 44: 86-93.
14. Johnson E. Cars and ground-level ozone: how do fuels compare? *European Transport Research Review*, 2017; vol. 9. no. 47 (2017). DOI:10.1007/s12544-017-0263-7
15. Navas-Anguita Z., Garcia-Gusano D., Iribarren D. A review of techno-economic data for road transportation fuels. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2019, pp. 11-26. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.041
16. Starinskaya G. Kak v Rossii ustroen rynek AZS? [How the gas station market is arranged in Russia]. *Vedomosti*. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/10/13/737707-kak-ustroen-ri-nok-azs>, last accessed 20.08.2021.
17. Milojević S. T. Sustainable application of natural gas as engine fuel in city buses – benefit and restrictions. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017; vol. 15. no. 1: 81 -88. DOI:10.5937/jaes15-12268
18. Tica S., Živanović P., Bajčetić S., Milovanović B., Nađ A. Study of the fuel efficiency and ecological aspects of CNG buses in urban public transport in Belgrade. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; vol. 17. no. 1: 65-73. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-17035>
19. Suvorov A. S. Perevod rossijskogo avtotransporta na gazomotornoe toplivo osushhestvlyajetsja medlenno [The transfer of Russian vehicles to gas engine fuel is slow]. *AvtoGazoZapravochnyj kompleks + Al'ternativnoe toplivo*. 2019; vol. 18. no. 12: 556-557. (In Russ.)
20. Timirhanova L. F. Pel'menjova A. A. Faktory razvitiya rynka gazomotornogo topliva v regionah RF [Factors of development of the gas engine fuel market in the regions of the Russian Federation]. *Problemy jekonomiki i upravlenija neftegazovym kompleksom*. 2020; vol. 8 (188):37-46.
21. Xie X., Wang Y., Li X. The Usage Analysis and Policy Choice of CNG Taxis Based on a Multi-stage Dynamic Game Model. *Computational Economics. Springer; Society for Computational Economics*. 2019; vol. 54(4): 1379-1390. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10614-016-9645-5>
22. Zhou Y., Zhou Z. The current level of development of the Chinese CNG automobile market, its future trends and strategies. *Natural Gas and LNG*. 2009; vol. 10: 44-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.04.010>
23. Huang K., Lv Y., Huang C., Wang Y., Niu Y., Yang W. Prediction of CNG automobile ownership by using the combined model. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. vol. 6: 2422-2427.
24. Ajanovic A., Haas R. Economic and Environmental Prospects for Battery Electric - and Fuel Cell Vehicles, *A Review fuel cells*. 2019; vol. 19 (5): 515-529. DOI: 10.1002/fuce.201800171
25. Synák F., Kučera M., Skrúcaný T. Assessing the Energy Efficiency of an Electric Car. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021; vol. 23. no. 1: A1-A13. DOI: 10.26552/com.C.2021.1.A1-A13
26. Campana M., Inga E., Cardenas J. Optimal Sizing of Electric Vehicle Charging Stations Considering Urban *Traffic Flow for Smart Cities. Energies*. 2021; vol. 14 (16). no. 4933. DOI: 10.3390/en14164933
27. Eltoumi F. M., Becherif M., Ramadan H. S. The key issues of electric vehicle charging via hybrid power sources: Techno-economic viability, analysis, and recommendations. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2021; vol. 138 no. 110534. DOI:10.1016/j.rser.2020.110534
28. Petrovic D. T., Pesic D. R., Mijailovic R. M. Electric cars are they solution to reduce co2 emission? *Thermal science*. 2020; vol. 24(5): 2879-2889. DOI: 10.3390/su14063371
29. Ponsree K., Gebombut N., Naruetharadhol P. Environmental Awareness and Adoption Intention of Electric Cars in Young Adult. *Modern management based on big data*. 2021: 165 -174.
30. Solcan S., Rozsos R., Neamtu C. Designing a car seat for electrical car. *Acta technica napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering*. 2019; vol. 62 (4): 617-622.
31. Novosti. KamAZ i GAZ postavjat Moskve pervye 200 jelektrobusov [News. KAMAZ and GAZ will supply Moscow with the first 200 electric buses]. *Avtogazozapravochnyj kompleks + al'ternativnoe toplivo*. 2018; 7: 335. (In Russ.)
32. Na linii moskvy vyshel 300-j jelektrobus. *Avtogazozapravochnyj kompleks + al'ternativnoe toplivo* [The 300th electric bus entered the Moscow line]. 2020. vol. 3:152. (In Russ.)
33. Bludjan N. O. Ocenka perspektivy ispol'zovaniya jelektricheskikh avtobusov na gorodskom transporte [Assessment of the prospects for the use of electric buses in public transport]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie. nauchnyj informacionnyj sbornik*. 2020; vol. 8: 28-36. (In Russ.)

34. Moshkov V. B., Ovchinnikov V. V., Barannik A. J. u. Predposylki i tendencii razvitiya jelektromobilej [Prerequisites and trends in the development of electric vehicles]. *Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2021; 2 (68): 14-19. (In Russ.)
35. Fülöp M. T., Gubán M., Kovács G., Avornicului M. Economic Development Based on a Mathematical Model: An Optimal Solution Method for the Fuel Supply of International Road Transport Activity. *Energies*. 2021; vol. 14, no. 2963. DOI: 10.3390/en14102963
36. Nikolin V. I., Vitvickij E. E., Mochalin S. M. *Gruzovye avtomobil'nye perevozki: monografija*. [Freight road transportation: Monograph]. 2-e izdanie. Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI), 2004. 480 p. (In Russ.)
37. Nikolin V. I., Mochalin S. M., Pogulyaeva I. V. Ocenivaem jeffektivnost'. [We assess the effectiveness]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtohozjajstvo*. 2005. no. 10. pp. 36-38. (In Russ.)
38. Vojtenkov S. S., Shapoval D. V., Vitvickij E. E. K voprosu o terminologii na avtomobil'nom transporte [To the question of terminology in road transport]. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2015; 4 (44): 11-15. (In Russ.)
39. Banket M. V., Shapoval D. V., Bakunov A. S. Primenenie prirodnogo gaza obshhestvennym avto-busnym transportom v gorode Omske pri uslovii racional'nogo razmeshhenija gazovyh zapravochnyh stancij [he use of natural gas by public bus in the city of Omsk, subject to the rational placement of gas filling stations]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2017; 3: 78-82. (In Russ.)
40. Banket M. V., Shapoval D. V., Vojtenkov S. S. Ekonomicheskaya otsenka ispol'zovaniya prirodnogo gaza na kommercheskom avtomobil'nom transporte pri perevozke khleba v gorode Omske [Economic assessment of the use of natural gas on commercial road transport when transporting bread in Omsk]. *Gruzovik*. 2021; 12. (2021): 35-42.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Концептуализация – Банкет М. В., Алешков Д. С.
 Методология – Банкет М. В., Шаповал Д. В.
 Программное обеспечение – Шаповал Д. В.,
 Эйхлер И. А., Валидация – Банкет М. В.
 Официальный анализ – Шаповал Д. В., Алеш-
 ков Д. С.
 Исследования – Банкет М. В., Шаповал Д. В.,
 Алешков Д. С., Ресурсы – Банкет М. В., Погуля-
 ева И. В., Эйхлер И. А.,
 Курирование данных – Погуляева И. В., Эйх-
 лер И. А.
 Подготовка первоначального проекта – Шапо-
 вал Д. В.
 Обзор и редактирование – Банкет М. В., Погу-
 ляева И. В.
 Администрирование проекта – Алешков Д. С.,
 Эйхлер И. А.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Conceptualization – Mikhail V. Banket, Denis S. Aleshkov
 Methodology – Mikhail V. Banket, Dmitry V. Shapoval
 Software – Dmitry V. Shapoval, Ivan A. Eychler

Validation – Mikhail V. Banket
 Official analysis – Dmitry V. Shapoval, Denis S. Aleshkov
 Research – Mikhail V. Banket, Dmitry V. Shapoval, Denis S. Aleshkov
 Resources – Mikhail V. Banket, Irina V. Pogulyaeva, Ivan A. Eychler
 Data management – Irina V. Pogulyaeva, Ivan A. Eychler
 Preparation of the initial draft – Dmitry V. Shapoval
 Review and editing – Mikhail V. Banket, Irina V. Pogulyaeva
 Project administration – Denis S. Aleshkov, Ivan A. Eychler

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Викторович Банкет – канд. техн. наук, доц., и.о. директора института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника», доц. кафедры «Автомобильный транспорт», SPIN-код: 3698-4459.

Дмитрий Владимирович Шаповал – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», институт «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника», SPIN-код: 1720-5332.

Эйхлер Иван Андреевич – канд. экон. наук, доц. кафедры «Экономика, логистика и управления качеством», институт «Информационные системы, экономика и управление», SPIN-код: 7562-4729.

Денис Сергеевич Алешков – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение», институт «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника», SPIN-код: 2503-8585.

Ирина Владимировна Погуляева – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Экономика, логистика и управления качеством», институт «Информационные системы, экономика и управление», SPIN-код: 4007-8472.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail V. Banket – Cand. of Sci., Associate Professor, Director of the Automobile Transport, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, Associate Professor of the Automobile Transport Department, SPIN-код: 3698-4459.

Dmitry V. Shapoval – Cand. of Sci., Associate Professor, Transportation and Traffic Safety Department, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, SPIN-код: 1720-5332.

Ivan A. Eychler – Cand. of Sci., Associate Professor, Economics, Logistics and Quality Management department, Information Systems, Economics and Management Institute, SPIN-код: 7562-4729.

Denis S. Aleshkov – Cand. of Sci., Associate Professor, Automation and Power Engineering Department, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, SPIN-код: 2503-8585.

Irina V. Pogulyaeva – Cand. of Sci., Associate Professor, Economics, Logistics and Quality Management Department, Information Systems, Economics and Management Institute, SPIN-код: 4007-8472.

Научная статья
УДК 656.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>
EDN: HFGKBJ



ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АВАРИЙНО-ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Е. В. Печатнова^{1*}, К. С. Нечаев²

¹Барнаульский юридический институт МВД РФ
г. Барнаул, Россия

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул, Россия

phukcia@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9182-2365>

t1001t@mail.ru, <http://orcid.org/0000-002-2094-7723>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Безопасность дорожного движения является одним из целевых государственных ориентиров. Одним из индикаторов состояния дорожно-транспортной аварийности в государственных программах является число аварийно-опасных участков. Снижение их числа приведет к значительному подъему уровня безопасности в связи с тем, что на этих участках концентрируется большое число ДТП, погибших и раненых. Поэтому задача по определению факторов формирования аварийно-опасных участков является актуальной.

Материалы и методы. Исследование основано на данных о ДТП, которые были зафиксированы на федеральных автомобильных дорогах Алтайского края в период с 2018 по 2021 г. Порядок выполнения работы включал три этапа. На первом определены аварийно-опасные участки на основе данных за 2021 год. На втором этапе определялись особенности аварийности на этих участках в предыдущие годы. На третьем определялись основные факторы формирования каждого из выделенных участков с помощью анализа схем расстановки средств организации дорожного движения и архивного видеоматериала по дорогам (съёмки дорог).

Выводы. Комплексный анализ аварийно-опасных участков федеральных дорог Алтайского края позволил выделить ряд типичных условий, которые способствуют формированию повышенной аварийности. Среди них: значительное изменение скоростного режима, близость к городу, наличие большого числа конфликтных точек, проведение дорожных работ.

Рамки исследования/возможность последующего использования результатов научной работы. Результаты работы могут быть использованы в работах по комплексному изучению факторов возникновения аварийно-опасных участков на автомобильных дорогах федерального значения, моделированию различных дорожных условий и условий внешней среды на степень аварийность участка дороги.

Практическое значение. Новые знания об основных факторах и условиях формирования аварийно-опасного участка позволят ответственным службам снижать степень опасности аналогичных участков за счет предупреждения одновременного действия всех выделенных условий.

Оригинальность. В исследовании впервые определены и обоснованы конкретные условия, которые в своей совокупности способствуют формированию аварийно-опасного участка на федеральных автомобильных дорогах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность дорожного движения (БДД), дорожно-транспортные происшествия (ДТП), аварийно-опасный участок, условия формирования аварийности, федеральные дороги

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

Статья поступила в редакцию 29.11.2022; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Печатнова Е. В., Нечаев К. С., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Печатнова Е. В., Нечаев К. С. Факторы формирования аварийно-опасных участков на автомобильных дорогах федерального значения // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 92-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>

EDN: HFGKBJ

FACTORS FOR TRAFFIC ACCIDENT-PRONE SECTION FORMATION ON FEDERAL ROADS

Elena V. Pechatnova^{1*}, Konstantin S. Nechaev²

¹Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia Federation
Barnaul, Russia

²Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia

<http://orcid.org/0000-0001-9182-2365>, phukcia@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-002-2094-7723>, t1001t@mail.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Road safety is one of the state targets. One of the indicators of the state of road traffic accidents in state programs is the number of traffic accident-prone section. Reducing their number will lead to a significant increase in the level of security. This is due to the fact that a large number of accidents, deaths and injuries are concentrated in these sections. Therefore, the task of determining the factors of the formation of traffic accident-prone section is relevant.

Materials and methods. The study is based on data on accidents that occurred on the federal motorways of the Altai Territory in the period from 2018 to 2021. The procedure for performing the work included three stages. At the first stage, traffic accident-prone section was identified based on the data for 2021. At the second stage, the features of accidents in these sections in previous years were determined. At the third stage, the main factors of accident formation were determined by analyzing the layout of traffic management tools, video material on roads (road shooting).

Results. A comprehensive analysis of traffic accident-prone section of federal roads in the Altai Territory allowed to identify a number of typical conditions that contribute to the formation of increased accident risk. Among them: a significant change in the speed limit, proximity to the city, the presence of a large number of conflict points, road works.

The scope of the study / the possibility of subsequent use of the results of scientific work. The results of the work can be used in the work on the comprehensive study of the factors of occurrence of traffic accident-prone section on federal motorways, modelling various road conditions and environmental conditions on the degree of accident of a road section.

Practical importance. Knowledge about the main factors and conditions of the formation of traffic accident-prone section will allow responsible services to reduce the degree of danger of similar sections by preventing the simultaneous action of all selected conditions.

Originality. For the first time, the study identifies and substantiates specific conditions that collectively contribute to the formation of traffic accident-prone section on federal roads.

KEYWORDS: road safety (RTS), road traffic accidents (RTA), traffic accident-prone section, conditions for the accidents formation, federal roads

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

© Pechatnova E. V., Nechaev K. S., 2023



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

The article was submitted 29.11.2022; approved after reviewing 10.01.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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. Pechatnova Elena V., Nechaev Konstantin S. Factors for traffic accident-prone section on federal roads formation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 92-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности дорожного движения представляет собой одно из условий эффективного функционирования и развития транспортных систем городов, регионов и страны. Высокая аварийность на дорогах представляет собой самостоятельную социально-экономическую и демографическую проблему [1, 2, 3, 4]. Согласно статистической информации ежедневно на дорогах России погибает около 50 чел, что равносильно ежедневной авиакатастрофе; аналогичные показатели в зарубежных странах отличаются более низкими значениями [5]. Высокое число ДТП и погибших в них ставит перед государством и обществом России новую важную цель по повышению уровня безопасности на дорогах [6]. Эти задачи являются частью государственной политики и реализуются как на общероссийском уровне, так и на региональном, местном, в том числе городском [7].

Одним из основных индикаторов многих государственных проектов, программ и планов мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения в России и в других странах является снижение числа аварийно-опасных участков дороги. Особое внимание к таким участкам вызвано тем, что при их малой относительной протяженности на них концентрируется большое число ДТП, количество погибших и раненых [8]. Показатели аварийности в таких местах зачастую вносят большой вклад в снижение общего уровня безопасности дорожного движения на улично-дорожной сети города, региона, а направленные действия на предупреждение ДТП на этих отрезках дороги являются эффективным и экономичным способом снижения аварийности [9]. Определение причин, факторов и закономерностей, обуславливающих возникновение ДТП на этих участках, позволит сформировать необходимый комплекс мероприятий по предупреждению ДТП, тем самым значительно повышая

общий уровень безопасности дорожного движения [10].

Анализ показателей аварийности в опасных участках, разработка мер по снижению числа ДТП, согласование и мониторинг реализации мероприятий являются основными этапами повышения безопасности дорожного движения во многих странах [11], а основой управления является методология BlackSpotManagement [12, 13, 14]. Однако, не смотря на единство подхода, различаются не только способы снижения аварийности на опасных участках, правила выбора мероприятий, но и само понятие «аварийно-опасный участок». Так в ряде стран используются числовые критерии. Например, в Венгрии к таким участкам за пределами населенных пунктов относятся «участки дорог длиной не более 100 м, на которых количество аварий за последние три года составляет не менее 3» [15]. Схожий критерий используется в России: к аварийно-опасному участку вне населенных пунктов относится «отрезок дороги, не превышающий 1000 м, либо пересечение дорог, где в течение отчетного года произошло три и более дорожно-транспортных происшествия одного вида или пять и более дорожно-транспортных происшествий независимо от их вида, в результате которых погибли или были ранены люди»¹. В ряде других стран используется относительный критерий: в Швейцарии это участки дорожной сети (или перекрестки), где количество аварий «намного превышает» количество аварий на сопоставимых участках [15].

В связи с широкой распространенностью методологии BlackSpotManagement в отношении обеспечения безопасности движения, многие ученые проводят исследования в данной области, которые можно разделить на две группы. Первая группа – это работы, связанные с прямым методом идентификации аварийно-опасных участков, т.е. основанных на статистическом анализе накопленных данных

¹ Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» от 10.12.1995 N 196-ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8585/ (дата обращения: 01.02.2022).

о ДТП. Среди них наиболее распространены работы на основе применения геоинформационных систем [16, 17, 18, 19, 20, 21], также применяются методы динамического моделирования на основе вейвлет-анализа [22], на основе байесовского метода [23].

Ко второй группе относятся разработки в области определения потенциальных аварийно-опасных участков, т.е. анализ факторов, приводящих к увеличению числа аварий. Среди них развиваются методы оценки конфликтных точек, коэффициентов безопасности [9]. Также многие ученые в настоящее время сосредотачиваются на исследовании «бесповеденческих» факторах возникновения ДТП, то есть на анализе таких элементов как время суток, погодные условия, геометрические характеристики дороги и другие [24]. Выявление факторов и закономерностей формирования аварийно-опасных участков представлено в отдельных работах, например, в работе [25] приведен анализ дорожных параметров отрезка National Highway-44 (Индия), на основе которых авторы определили потенциально опасные участки дороги и предложили меры по снижению аварийности. Цикл исследований [26, 27] посвящен анализу влияния геометрических характеристик участка на потенциально высокую аварийность на основе метода относительных частот. Влияние ряда факторов (время суток, особенности расположения участка дороги и другие) на возникновение аварийно-опасных участков были проанализированы в работе [28]. Опасная придорожная среда, метеорологические условия как факторы возникновения аварийно-опасных участков исследованы в работе [29]. Также можно отметить цикл работ исследователей СПбГАСУ, посвященных исследованию аварийно-опасных участков дороги, в которых приведены результаты системного подхода и оценки мест концентрации ДТП с учетом натурных исследований [30, 31].

Цель работы – определение факторов формирования аварийно-опасных участков на дорожной сети, что является не только практико-ориентированным вектором научных исследований, но и необходимым направлением для совершенствования методологии обеспечения безопасности дорожного движения. В связи со значительной разницей в процессах

формирования аварийности на различных типах дорог для исследования выбраны федеральные автомобильные дороги, поскольку в настоящее время работы по определению факторов формирования аварийно-опасных участков на них немногочисленны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой исследования являются данные о ДТП, зафиксированных на федеральных автомобильных дорогах Алтайского края в период с 2018 по 2021 г. Изучались как аварии с пострадавшими, так и без них – только с материальным ущербом. Сведения об аварии включали в себя дату, время, место и тип происшествия, количество погибших и пострадавших. Основным методом исследования является анализ статистической информации.

Сеть федеральных дорог Алтайского края представляет собой три основных направления, связывающих между собой не только регионы России, но и являющихся основными транспортными путями в Республику Казахстан, а также в Монголию. Она представлена следующими дорогами (рисунок 1): А-321 Барнаул – Павловск – Кулунда – граница с Республикой Казахстан (по направлению к Павлодару, Астане), А-322 Барнаул – Рубцовск – граница с Республикой Казахстан (по направлению к Семей, Алматы), Р-256 «Чуйский тракт» (северное направление к Новосибирску, южное к Горно-Алтайску и Монголии, Улгий – Азиатская магистраль АН-4).

Последовательность выполнения исследования следующая. На первом этапе выделены аварийно-опасные участки дороги, соответствующие критериям, установленным к ним в России: проанализированы данные о ДТП с пострадавшими или погибшими, зафиксированные на выбранных дорогах в 2021 г. На втором этапе проведен анализ аварийности на этих участках в 2018–2020 гг., в том числе учитывались аварии без пострадавших. На третьем этапе определены причины и факторы, способствующие формированию аварийно-опасного участка на основе исследования анализа схем расстановки средств организации дорожного движения за каждый год, архивных видеоматериалов (съемка дорог за 2018–2021 гг.), дорожных условий участка, и внешних факторов возникновения ДТП.



Рисунок 1 – Сеть автомобильных дорог федерального значения в Алтайском крае
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The network of federal roads of the Altai Territory
Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Расположение аварийно-опасных участков, 2021 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Location of traffic accident-prone section, 2021
Source: compiled by the authors.

Таблица

Показатели аварийности на рассматриваемых аварийно-опасных участках дороги

Источник: составлено авторами.

Table

Accident rates on the considered traffic accident-prone section

Source: compiled by the authors.

Участки	Показатели аварийности ДТП без пострадавших: количество за год (количество по видам) ДТП с пострадавшими: количество за год (количество по видам) Пострадало: общее количество за год Погибло: общее количество за год		
	2018	2019	2020
Участок № 1	ДТП без пострадавших: 0 ДТП с пострадавшими: 3 (2 наезда на пешехода, столкновение) Пострадало: 3 Погибло: 1	ДТП без пострадавших: 0 ДТП с пострадавшими: 2 (2 столкновения) Пострадало: 4 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 0 ДТП с пострадавшими: 2 (наезд на стоящее ТС, столкновение) Пострадало: 4 Погибло: 0
Участок № 2	ДТП без пострадавших: 0 ДТП с пострадавшими: 1 (столкновение) Пострадало: 0 Погибло: 1	ДТП без пострадавших: 0 ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 1 ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0
Участок № 3	ДТП без пострадавших: 2 ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 3 (столкновения) ДТП с пострадавшими: 2 (съезд с дороги, столкновение) Пострадало: 2 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 4 (3 столкновения, наезд на препятствие) ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0
Участок № 4	ДТП без пострадавших: 8 (отбрасывание предмета, 2 наезда на препятствие, 5 столкновений) ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 6 (3 наезда на препятствие, 3 столкновения) ДТП с пострадавшими: 1 (наезд на препятствие) Пострадало: 2 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 12 (3 наезда на препятствие, 9 столкновений) ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0
Участок № 5	ДТП без пострадавших: 3 (наезд на препятствие, 2 столкновения) ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 3 (столкновение, 2 наезда на препятствие) ДТП с пострадавшими: 0 Пострадало: 0 Погибло: 0	ДТП без пострадавших: 4 (наезд на препятствие, наезд на животное, 2 столкновения) ДТП с пострадавшими: 1 (опрокидывание) Пострадало: 1 Погибло: 0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования выделены 5 аварийно-опасных участков, 2 из них зафиксированы на дороге А-322, остальные – на дороге Р-256. На дороге А-321 аварийно-опасных участков нет. Расположение участков представлено на рисунке 2. Все они расположены в близости городов. Участки № 1, 2, 5 сформированы тремя столкновениями, участок № 3 образован шестью ДТП различных видов, среди которых 4 столкновения, съезд с дороги и наезд на лицо, не являющееся участником дорожного движения, осуществляющее какую-либо другую деятельность. Участок № 4 сформирован 5 ДТП, среди которых 2 столкновения, наезд на пешехода, наезд на препят-

ствие, падение пассажира. Летальные исходы фиксировались на участках № 2, 3, 5.

На следующем этапе рассмотрена аварийность на выделенных участках в предыдущие 3 года. Результаты представлены в таблице.

Определено, что ни один из участков не является устойчивым местом концентрации ДТП – не соответствовал критериям аварийно-опасного участка в предыдущие годы, однако большая часть рассматриваемых отрезков дороги отличалась высокой аварийностью.

На третьем этапе, целью которого является определение причин и факторов, способствующих формированию аварийно-опасного участка, проанализированы дорожные условия и внешние факторы возникновения ДТП.

Участок № 1 представляет собой отрезок дороги длиной 900 м, на котором находятся несколько перекрестков, остановка общественного транспорта и пешеходный переход. Особенностью является то, что один из перекрестков является въездом в поселок Южный города Барнаула, который отличается высокой интенсивностью движения и до 2020 г. являлся нерегулируемым. В 2021 г. изменилась организация дорожного движения на участке – установлен светофорный объект с дополнительной секцией для безопасного въезда в поселок. Также на участке была расположена граница г. Барнаула, что способствовало смене скоростного режима. Все ДТП происходили в период с июня по октябрь, что может свидетельствовать о том, что интенсивность движения является одним из основных факторов аварийности.

Участок № 2 является отрезком длиной 900 м, на котором расположено частично канализированное пересечение дорог, одна из которых ведет в поселок Бельмесево, а также остановка общественного транспорта и нерегулируемый пешеходный переход. Все ДТП происходили в дневное время в период с июля по ноябрь.

На участке № 3 (длина 1000 м) велась реконструкция: расширение числа полос движения до четырех. На отрезке дороги расположено несколько перекрестков с переходно-скоростными полосами, нерегулируемый пешеходный переход. ДТП происходят в разное время суток и месяцы, и вероятно связаны с изменением организации дорожного движения в период реконструкции.

Участок № 4 (длина 1000 м) является сложным пересечением – узлом в виде двухуровневой развязки с кольцевыми пересечениями и примыканиями дорог. На данном отрезке дороги водители осуществляют въезд и выезд в поселки Березовка, Солнечное и город Новоалтайск. Фактор времени не является основным, поскольку аварии происходят в разное время суток.

Участок № 5 (длина 1000 м) также является сложным транспортным узлом, который соединяет транспортные потоки, выезжающие из г. Бийска и съезжающие с дороги Р-256 Обход г. Бийска. Отличительной особенностью аварийности рассматриваемого участка является высокая доля наездов на препятствие, составляющая 31% (с учетом ДТП без пострадавших в 2021 г.).

Все участки находятся в зоне изменения скоростного режима – вблизи въезда / выезда из городов и населенных пунктов. Также характерной чертой всех участков является большое количество конфликтных точек (слияния,

пересечения, разветвления) при интенсивном движении конфликтующих направлений. Кроме того, на двух из пяти участках проводились различные типы дорожных работ, что увеличивало вероятность возникновения ДТП в совокупности со сложностью отрезка дороги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение факторов формирования аварийно-опасных участков на дорожной сети является важным научно-практическим направлением повышения безопасности дорожного движения в связи с экономической эффективностью такого подхода и возможностью значительно снизить показатели аварийности в сжатые сроки. Кроме того, развитие методологии повышения безопасности также требует исследования факторов возникновения аварийно-опасных участков, что развивает соответствующую теорию.

Проведенное на примере Алтайского края исследование позволило выявить конкретный комплекс факторов, способствующий возникновению аварийно-опасных участков на федеральных автомобильных дорогах. Важно отметить, что выделенные факторы представляют собой совокупность – именно их совместное действие вызывает высокую аварийность. К первому фактору отнесена сложность пересечения: все участки являются сложными пересечениями интенсивных конфликтующих потоков, причем канализированные пересечения или пересечения в разных уровнях не позволяют снизить аварийность до приемлемого уровня. Ко второму фактору из выделенной совокупности относится изменение скоростного режима – одно из направлений движения является въездом / въездом в населенный пункт или город.

Таким образом, к потенциальным аварийно-опасным местам относятся сложные пересечения вблизи городов и населенных пунктов с высокой интенсивностью движения транспортного потока. Решающим фактором, который способствует высокой аварийности, является проведение дорожно-строительных работ на данных участках.

На основе полученных результатов можно сформировать следующие практические рекомендации по повышению уровня безопасности дорожного движения: обеспечение плавного изменения скоростного режима на подходах к городам и населенным пунктам, что можно обеспечить с помощью снижения допустимого скоростного режима (установки знаков) совместно с установкой комплексов фото-видеофиксации нарушений ПДД; реализация дополнительного информирования водителей об изменении ус-

ловий движения на ближайших динамических информационных табло.

Кроме того, в заключение можно отметить, что предлагаемые практические мероприятия (ограничение скорости движения, информационное обеспечение водителей, оборудование средствами фото-видеофиксации нарушений ПДД) согласуются с мерами, указанными в рекомендациях проектного кабинета по национальному проекту «Безопасные и качественные дороги»². Однако при этом в данном документе отсутствуют сведения о подходах к городам как о потенциальном аварийно-опасном участке. В связи с этим службам, ответственным за безопасность движения, рекомендуется дополнительно учитывать данный фактор при планировании работ по предупреждению и ликвидации аварийно-опасных участков на федеральных автомобильных дорогах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. FazleSubhan, Shengchuan Zhao, El BachirDiop, Yasir Ali, Hongmei Zhou Public intention to pay for road safety improvement: A case study of Pakistan // *Accident Analysis & Prevention*. 2021. V160. 106315. doi: 10.1016/j.aap.2021.106315.
2. Heather E Rosen, Imran Bari, Nino Paichadze, Margaret Peden, MelekidzedekKhayesi, JesúsMonclús, Adnan A Hyder Global Road Safety 2010-18: An Analysis of Global Status Reports // *Injury*. 2022. S0020-1383(22)00504-6. doi: 10.1016/j.injury.2022.07.030.
3. Vladimir Pajković, Mirjana Grdinić-Rakonjac Age-related differences in attitudes and perception on road safety issues in Montenegro // *Transportation Research Procedia*. 2022. Volume 60.pp. 584-591, doi: 10.1016/j.trpro.2021.12.075.
4. Akinori Morimoto, Ailin Wang, NaohiroKitano, A conceptual framework for road traffic safety considering differences in traffic culture through international comparison, // *IATSS Research*. 2022. Volume 46, Issue 1. P. 3-13. doi: 10.1016/j.iatssr.2021.11.012.
5. Grushetsky, S., Brylev, I., Evtukov, S., Pushkarev, A. Road accident prevention model involving two-wheeled vehicles // *Transportation Research Procedia*. 2020. 50. pp. 201–210. doi: 10.1016/j.trpro.2020.10.025.
6. Lobanova Y., Evtukov S. Role and methods of accident ability diagnosis in ensuring traffic safety // *Transportation Research Procedia*. 14. Сер. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. pp. 363-372.
7. Печатнова Е. В., Кузнецов В. Н. Факторы возникновения дорожно-транспортных происшествий с особо тяжкими последствиями // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 2 (84). С. 224-235. doi: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-224-235.

8. Гатиятуллин М. Х., Шихалеева А. В. Прогнозирование мероприятий по ликвидации и профилактике мест концентрации дорожно-транспортных происшествий // *Техника и технология транспорта*. 2021. № 4 (23). 8 с.

9. Hongjun Cui, Jianguo Dong, Mingqing Zhu, Xia Li, Qingzhou Wang Identifying accident black spots based on the accident spacing distribution // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022 doi: 10.1016/j.jtte.2021.02.006.

10. Pechatnova E., Kuznetsov V. Assessment of the conditions for allocating independent road safety ITS subsystem // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Т. 1258. pp. 136-145. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_13

11. Nikhil T.R, Harish J Kulkarni, Sarvada H. Identification of Black Spots and Improvements to Junctions in Bangalore City // *International Journal of Scientific Research*. 2013. 2(8). pp.136-139.

12. Osman Lindov, Fadila Kiso, Adnan Omerhodžić, MuhamedBegovićBSM- black spot management as methodology approach in increasing safety of road traffic // *7th International Maritime Science Conference (IMSC) April 20th-21st, 2017, Solin, Croatia*. 2017. pp. 445 – 451.

13. Nešić, M., Lipovac, K., Vujanić, M., Jovanović, D. Roadside public survey approach in black spot identification on rural roads: case study // *Transport*. 2016. vol. 31(2). pp. 271–281. doi:10.3846/16484142.2016.1193055.

14. De Pauw, E., Daniels, S., Brijis, T., Hermans, E., Wets, G. Safety effects of an extensive black spot treatment programme in Flanders-Belgium // *Accident Analysis & Prevention*. 2014. V66. pp. 72–79. doi: 10.1016/j.aap.2014.01.019.

15. Szénási S. Analysis of historical road accident data supporting autonomous vehicle control strategies // *PeerJ Computer Science*. 2021. 7: e399. doi:10.7717/peerj-cs.399.

16. Bolla M E, Djahi B S The development of road databases and analysis of traffic accident-prone section (blacksite) based on Geographic Information System (GIS) // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2018. 403. 012062. doi: 10.1088/1757-899X/403/1/012062.

17. Saran M.S. Evaluation of accident black spots on roads using geoinformatics tools in Kozhikode district, Kerala // *Journal of Geomatics*. 2017. Vol 11. No. 2. pp.218 – 223.

18. Prof. Jessy Paul, Anu Jo Mariya, Gopika Viswanath, Jyothish Kumar K, Punyo Robin Identification of Black Spots and Analysis Using GIS: Case study from Kothamangalam, Kerala // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Volume 04. Issue 03. pp. 2037 – 2041.

19. Mehmet Ali Dereli, Saffet Erdogan A new model for determining the traffic accident black spots using GIS-aided spatial statistical methods // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017. Volume 103. pp 106-117. doi: 10.1016/j.tra.2017.05.031.

² Методические рекомендации по проведению мероприятий по улучшению условий дорожного движения и повышению безопасности дорожного движения в целях ликвидации мест концентрации дорожно-транспортных происшествий, включающие типовые решения [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/10/10093> (дата обращения: 01.12.2022).

20. Erdoğlan, S., Dereli, M.A. & Şenol, H.İ. A GIS-based assessment of long-term traffic accidents using spatiotemporal and empirical Bayes analysis in Turkey // *Appl Geomat.* 2022. 14. pp. 147–162 doi: 10.1007/s12518-022-00419-1.

21. Ma, Q., Huang, G. Tang, X. GIS-based analysis of spatial-temporal correlations of urban traffic accidents // *Eur. Transp. Res. Rev.* 2021. 13. 50. doi:10.1186/s12544-021-00509-y.

22. Amin Mirza Boroujerdian, Mahmoud Saffarzadeh, Hassan Yousefi, Hassan Ghassemian, A model to identify high crash road segments with the dynamic segmentation method // *Accident Analysis & Prevention.* 2014. Volume 73. pp. 274-287. doi: 10.1016/j.aap.2014.09.014.

23. Ni Dong, Helai Huang, Jaeyoung Lee, Mingyun Gao, Mohamed Abdel-Aty Macroscopic hotspots identification: A Bayesian spatio-temporal interaction approach // *Accident Analysis & Prevention.* 2016. Volume 92. pp. 256-264. doi:10.1016/j.aap.2016.04.001.

24. A. Y. Omari-Sasu, Adjei Mensah Isaac, R. K. Boadi Statistical Models for Count Data with Applications to Road Accidents in Ghana // *International Journal of Statistics and Applications.* 2016. 6(3). pp.123-137 doi: 10.5923/j.statistics.20160603.05.

25. Preethi S, Manjunatha M, Ranjitha B TangadagiBharath A, N Sunil Road Safety Performance Audit for National Highway-44 // *International Journal of Advanced Science and Technology.* 2020. Vol. 29(06), No. 6, pp. 7808-7819.

26. FeritYakar Identification of accident-prone road sections by using relative frequency method // *Traffic&Transportation.* 2015. Vol. 27. No. 6. pp. 539-547. doi:10.7307/PTT.V27I6.1609

27. Yakar, F. A multicriteria decision making-based methodology to identify accident-prone road sections // *Journal of Transportation Safety & Security.* 2019. 13. pp.143 - 157.

28. Eyob Mekonnen, EmerTucay Quezon, Murad Mohammed Investigation of traffic accident prone areas related to existing road condition and driver's behavior along menagesha- ambo road section // *World Journal of Engineering Research and Technology.* 2018. Vol. 4. Issue 2. pp. 64-81.

29. Xue, Gang and Huiying Wen. Crash-Prone Section Identification for Mountainous Highways Considering Multi-Risk Factors Coupling Effect // *Journal of Advanced Transportation.* 2019. 1-9. doi: 10.1155/2019/9873832.

30. Куракина Е.В. Об эффективности проведения исследований мест концентрации ДТП // *Вестник гражданских инженеров.* 2018. № 2 (67). С. 231-237. doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-237

31. Kurakina E., Kravchenko P., Brylev I., Rajczyk J. Systemic approach to auditing road traffic accident black spots // *Transportation Research Procedia.* 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. pp. 330-336. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.039.

REFERENCES

1. Fazle Subhan, Shengchuan Zhao, El Bachir Diop, Yasir Ali, Hongmei Zhou Public intention to pay for road safety improvement: A case study of Pakistan. *Accident*

Analysis & Prevention, 2021; vol. 160, 106315. doi: 10.1016/j.aap.2021.106315.

2. Heather E Rosen, Imran Bari, Nino Paichadze, Margaret Peden, Meleckidzedek Khayesi, Jesús Monclús, Adnan A Hyder Global Road Safety 2010-18: An Analysis of Global Status Reports. *Injury.* 2022; S0020-1383(22)00504-6. doi: 10.1016/j.injury.2022.07.030.

3. Vladimir Pajković, Mirjana Grdinić-Rakonjac Age-related differences in attitudes and perception on road safety issues in Montenegro. *Transportation Research Procedia.* 2022; vol. 60: 584-591. doi: 10.1016/j.trpro.2021.12.075.

4. Akinori Morimoto, Ailin Wang, Naohiro Kitano, A conceptual framework for road traffic safety considering differences in traffic culture through international comparison. *IATSS Research.* 2022; vol. 46, no. 1: 3-13. doi: 10.1016/j.iatssr.2021.11.012.

5. Grushetsky S., Brylev I., Evtukov S., Pushkarev A. Road accident prevention model involving two-wheeled vehicles. *Transportation Research Procedia*, 2020, 50, pp. 201–210. doi: 10.1016/j.trpro.2020.10.025.

6. Lobanova Y., Evtukov S. Role and methods of accident ability diagnosis in ensuring traffic safety. *Transportation Research Procedia.* 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020". 2020: 363-372.

7. Pechatnova E.V., Kuznetsov V.N. Factors causing road traffic accidents with particularly serious consequence. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022;19(2):224-235. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-224-235>

8. Gatijatullin M.H., Shihaleeva A.V. Prognozirovanie meroprijatij po likvidaciji i profilaktike mest koncentracii dorozhno-transportnyh proissheshtvij [Forecasting of measures for the elimination and prevention of places of concentration of road accidents]. *Tehnika i tehnologija transporta.* 2021; 4 (23): 8.

9. Hongjun Cui, Jianguo Dong, Mingqing Zhu, Xia Li, Qingzhou Wang Identifying accident black spots based on the accident spacing distribution. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).* 2022. doi: 10.1016/j.jtte.2021.02.006.

10. Pechatnova E., Kuznetsov V. Assessment of the conditions for allocating independent road safety ITS subsystem. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2021; 1258: 136-145. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_13

11. Nikhil T.R, Harish J Kulkarni, Sarvada H. Identification of Black Spots and Improvements to Junctions in Bangalore City. *International Journal of Scientific Research.* 2013; 2(8): 136-139.

12. Osman Lindov, Fadila Kiso, Adnan Omerhodžić, Muhamed Begović BSM- black spot management as methodology approach in increasing safety of road traffic. *7th International Maritime Science Conference (IMSC)*, April 20th-21st, 2017, Solin. Croatia, 2017: 445 – 451.

13. Nešić, M., Lipovac, K., Vujančić, M., Jovanović, D. Roadside public survey approach in black spot identification on rural roads: case study. *Transport.* 2016; 31(2): 271–281. doi:10.3846/16484142.2016.1193055.

14. De Pauw E., Daniels S., Brijis T., Hermans E., Wets G. Safety effects of an extensive black spot treatment programme in Flanders-Belgium. *Accident Anal-*

ysis & Prevention. 2014; vol. 66: 72–79. doi: 10.1016/j.aap.2014.01.019.

15. Szénási S. Analysis of historical road accident data supporting autonomous vehicle control strategies. *PeerJ Computer Science*, 2021, 7: e399. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.399>.

16. Bolla M. E., Djahi B. S The development of road databases and analysis of traffic accident-prone section (blacksite) based on Geographic Information System (GIS). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, 2018, 403, 012062. doi: 10.1088/1757-899X/403/1/012062.

17. Saran M. S. Evaluation of accident black spots on roads using geoinformatics tools in Kozhikode district, Kerala. *Journal of Geomatics*. 2017; 11. no. 2: 218 – 223.

18. Prof. Jessy Paul, Anu Jo Mariya, Gopika Viswanath, Jyothish Kumar K, Punyo Robin Identification of Black Spots and Analysis Using GIS: Case study from Kothamanagalam, Kerala. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017; vol.04, issue 03: 2037 – 2041.

19. Mehmet Ali Dereli, Saffet Erdogan A new model for determining the traffic accident black spots using GIS-aided spatial statistical methods. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017; vol. 103: 106–117. doi: 10.1016/j.tra.2017.05.031.

20. Erdoğan S., Dereli, M.A. & Şenol, H.İ. A GIS-based assessment of long-term traffic accidents using spatiotemporal and empirical Bayes analysis in Turkey. *Appl Geomat*, 2022, 14: 147–162 doi: 10.1007/s12518-022-00419-1.

21. Ma, Q., Huang, G. Tang, X. GIS-based analysis of spatial–temporal correlations of urban traffic accidents. *Eur. Transp. Res. Rev*, 2021, 13, 50. doi:10.1186/s12544-021-00509-y.

22. Amin Mirza Boroujerdian, Mahmoud Saffarzadeh, Hassan Yousefi, Hassan Ghassemian, A model to identify high crash road segments with the dynamic segmentation method. *Accident Analysis & Prevention*. 2014, vol. 73: 274–287. doi: 10.1016/j.aap.2014.09.014.

23. Ni Dong, Helai Huang, Jaeyoung Lee, Mingyun Gao, Mohamed Abdel-Aty Macroscopic hotspots identification: A Bayesian spatio-temporal interaction approach. *Accident Analysis & Prevention*. 2016; vol. 92: 256–264. doi: 10.1016/j.aap.2016.04.001.

24. A. Y. Omari-Sasu, Adjei Mensah Isaac, R. K. Boadi Statistical Models for Count Data with Applications to Road Accidents in Ghana. *International Journal of Statistics and Applications*. 2016; 6 (3): 123–137 doi: 10.5923/j.statistics.20160603.05.

25. Preethi S, Manjunatha M, Ranjitha B Tangadagi Bharath A, N Sunil Road Safety Performance Audit for National Highway-44. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; vol. 29(06); 6: 7808–7819.

26. Ferit Yakar Identification of accident-prone road sections by using relative frequency method. *Traffic & Transportation*, 2015; vol. 27, no. 6: 539–547. doi:10.7307/PTT.V27I6.1609

27. Yakar, F. A multicriteria decision making–based methodology to identify accident-prone road sections. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2019, 13, pp.143 – 157.

28. Eyob Mekonnen, Emer Tucay Quezon, Murad Mohammed Investigation of traffic accident prone areas related to existing road condition and driver's behavior along menagesha- ambo road section. *World Journal of Engineering Research and Technology*. 2018; vol. 4; Issue 2: 64–81.

29. Xue, Gang and Huiying Wen. Crash-Prone Section Identification for Mountainous Highways Considering Multi-Risk Factors Coupling Effect. *Journal of Advanced Transportation*. 2019; 1–9. doi: 10.1155/2019/9873832.

30. Kurakina E.V. Ob jeffektivnosti provedeniya issledovaniy mest koncentracii DTP [On the effectiveness of studies carried out at places of road traffic accident concentration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018; 2 (67): 231–237

31. Kurakina E., Kravchenko P., Brylev I., Rajczyk J. Systemic approach to auditing road traffic accident black spots. *Transportation Research Procedia*. 14. Sep. “14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020”. 2020: 330–336. DOI: 10.1016/j.trpro. 2020.10.039.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Печатнова Е. В. Вклад в общую работу составил 50%, что является ½ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

Нечаев К.С. Вклад в общую работу составил 50%, что является ½ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, результатов, обсуждения и заключения.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Elena V. Pechatnova. The contribution to the general work made is 50% that is ½ shares when developing the following sections of the scientific article: summaries, introductions, materials and methods, results, discussion and conclusion.

Konstantin S. Nechaev. The contribution to the general work amounted to 50%, which is ½ share in the development of the following sections of the scientific article: annotation, introduction, results, discussion and conclusion.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Печатнова Елена Владимировна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Информатика и специальная техника», SPIN-код: 1548-3254.

Нечаев Константин Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Организация и безопасность движения», SPIN-код: 3567-0615.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Pechatnova – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Computer Science and Special Technology Department, SPIN-код: 1548-3254.

Konstantin S. Nechaev – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Organization and Road Safety Department, SPIN-код: 3567-0615.

Научная статья

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-102-113>

EDN: RLRUMD



ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Л. С. Трофимова*, А. С. Вахрушев*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Россия**trofimova_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>.**cv-omsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7801-2616>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Практика работы подвижного состава автомобильного транспорта при перевозке грузов в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия]) показывает необходимость организации мероприятий, связанных с обеспечением безопасности дорожного движения на участках дорог с подъемами и спусками. Для предотвращения съездов подвижного состава с дороги и их опрокидывания в качестве тягача для автомобильного транспорта используют тракторную технику, применение которой требует затрат времени. Целью настоящей статьи является разработка нового теоретического инструментария для планирования работы подвижного состава, позволяющего определить затраты времени на перевозку.

Материалы и методы. При исследовании применяются натурные наблюдения для поездок, при выполнении которых использовалась тракторная техника в качестве тягача для автомобильного транспорта на маршрутах перевозок грузов, где движение осуществлялось на спусках и подъемах. Для определения вероятности возникновения события, значений доверительных интервалов времени движения подвижного состава с учетом доверительной вероятности – 0,95 применялись методы теории вероятностей и математической статистики. В качестве основы выполненных исследований использовались научные работы ученых по планированию работы подвижного состава с учетом особенностей организации дорожного движения при перевозке грузов в сложных условиях эксплуатации.

Результаты. Авторы определили затраты времени на перевозку грузов с применением тракторной техники в качестве тягача для планирования работы подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T на шести маршрутах. Установлена величина вероятности использования тракторной техники на исследуемых маршрутах для планирования работы подвижного состава IVECO-AMT 733910C/T.

Заключение. Представленные значения времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача могут быть использованы для практического применения в планировании в период с декабря по март при перевозке разборных элементов конструкций буровых установок и имущества бригад бурения скважин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: перевозка грузов, безопасность дорожного движения, суровые условия Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия]), дороги с подъемами и спусками

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят редакционную коллегию и редакционный совет научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», анонимных рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Трофимова Л. С., Вахрушев А. С., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Трофимова Л. С., Вахрушев А. С. Планирование работы подвижного состава с учетом особенностей организации дорожного движения при перевозке грузов в условиях Крайнего Севера // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-102-113>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-102-113>

EDN: RLRUMD

PLANNING OF ROLLING STOCK OPERATION CONSIDERING SPECIFIC FEATURES OF ROAD TRAFFIC MANAGEMENT WHEN TRANSPORTING GOODS IN THE FAR NORTH

Liudmila S. Trofimova, Sergei S. Vakhrushev

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

trofimova_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>.

cv-omsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7801-2616>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The operation practice for the rolling stock of road transport during the transportation of goods in the harsh conditions of the Far North (Republic of Sakha (Yakutia)) shows the necessity to organize measures related to ensuring road safety on road sections with ups and downs. To prevent rolling stock from running off the road and overturning, tractor equipment is used as a tractor for road transport, the use of which is time-consuming. The purpose of this article is to develop a new theoretical toolkit for planning the work of the rolling stock, which makes it possible to determine the time spent on transportation

Materials and methods. The study uses field observations for trips, during which tractor equipment was used as a tractor for road transport on cargo transportation routes, where movement was carried out on descents and ascents. Methods of probability theory and mathematical statistics were used to determine the probability of occurrence of an event, the values of confidence intervals for the time of movement of the rolling stock, taking into account the confidence probability of 0.95. As the basis of the performed research, the scientific work of scientists on the planning of the work of the rolling stock was used, taking into account the peculiarities of the organization of road traffic during the transportation of goods in difficult operating conditions.

Results. The authors determined the time spent on the transportation of goods using tractor equipment as a tractor for planning the work of IVECO-AMT 733910 C/T rolling stock on six routes. The value of the probability of using tractor equipment on the studied routes for planning the operation of IVECO-AMT 733910C/T rolling stock has been established.

Conclusions. The presented values of the movement time of the IVECO-AMT 733910 C/T rolling stock when transporting goods using tractor equipment as a tractor can be used for practical use in planning from December to March when transporting collapsible structural elements of drilling rigs and property of drilling crews.

KEYWORDS: goods transportation; road safety, harsh conditions of the Far North (Republic of Sakha (Yakutia)), roads with ups and downs

ACKNOWLEDGMENTS: the authors thank the editorial board and editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal, anonymous reviewers of the article.

The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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., Vakhrushev A. S. Planning of rolling stock operation considering specific features of road traffic management when transporting goods in the far north. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-102-113>

© Trofimova L. S., Vakhrushev S. S., 2023



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

Основные положения. В статье представлен научный подход к планированию работы подвижного состава грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера, который включает в себя применение методов теории вероятностей и математической статистики, натурные наблюдения для получения:

– вероятностных значений времени движения подвижного состава грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера на маршрутах перевозок грузов, где существуют дороги с подъемами и спусками и применяется тракторная техника в качестве тягача, обеспечивающая организацию безопасного дорожного движения в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия]);

– вероятности применения тракторной техники в качестве тягача для подвижного состава грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера на маршрутах перевозок грузов, где движение осуществляется на спусках и подъемах.

Для практической реализации определены плановые показатели работы подвижного состава IVECO-AMT 733910 С/Т в условиях Крайнего Севера.

ВВЕДЕНИЕ

Планирование работы подвижного состава автомобильного транспорта при перевозке грузов в интересах предприятий основного производства по разведке и добыче нефти и газа в суровых условиях Крайнего Севера имеет свои особенности, которые связаны с необходимостью учета влияния природно-климатических, дорожных, транспортных, сезонных факторов. Планируются показатели, зависящие от фактической грузоподъемности подвижного состава, пробега и времени работы [1].

Сменное время работы подвижного состава каждого типоразмера при перевозке груза на конкретном маршруте определяется по времени оборота, которое учитывает вероятностные значения временных показателей [1]:

– вероятностная величина времени движения подвижного состава;

– вероятностная величина времени на погрузку подвижного состава;

– вероятностная величина времени на выгрузку подвижного состава.

В рамках реализации ФЗ от 10.12.1995 №196-ФЗ «О безопасности дорожного движения»¹ разработаны «Методические рекомендации по проведению мероприятий по улучшению условий дорожного движения и повышению безопасности дорожного движения в целях ликвидации мест концентрации дорожно-транспортных происшествий, включающие типовые решения» (утв. протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 31.07.2019 N 5)². Для ликвидации дорожно-транспортных происшествий на участках дорог с высоким риском таких происшествий организации реализуют мероприятия, связанные с обеспечением безопасности дорожного движения.

В научных работах делается вывод о том, что в условиях образования скользкости степень опасности на подъемах и спусках, кривых в плане, а также их сочетание значительно увеличивается [2,3].

К строительству автомобильных дорог на нефтегазовых месторождениях предъявляются требования специальные требования³. Особое внимание уделяется природно-климатическим факторам Крайнего Севера при строительстве автомобильных дорог [4]. Организация дорожного движения на автозимниках и ледовых переправах не отличается от обычных дорог.

¹ Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» от 10.12.1995 N 196-ФЗ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8585/

² Методические рекомендации по проведению мероприятий по улучшению условий дорожного движения и повышению безопасности дорожного движения в целях ликвидации мест концентрации дорожно-транспортных происшествий, включающие типовые решения» (утв. протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 31.07.2019 N 5) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_331758/10421bc744db1d2e15ec9b5cd7bd6a065c7e75a4/

³ Пархоменко Н. А., Баженов П. Е., Кузенков А. В. Исследование технологии возведения насыпи при строительстве автомобильных дорог к кусту скважин в особо сложных условиях Севера // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития, посвященные 100-летию советской геодезии и картографии: Сборник материалов I Междунар. науч.-практ. конф. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. 2019. С. 94–99



Рисунок 1 – Внешний вид колеса грузового автомобиля с цепью против скольжения для движения на участках дорог с подъемами и спусками в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия])
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Layout of truck wheel with anti-slip chain for traffic on sections of roads with ascents and descents in harsh conditions of the Far North (Republic of Sakha (Yakutia))
Source: compiled by the authors.

На зимниках и переправах устанавливаются дорожные знаки, шлагбаумы, разделительные полосы⁴.

Содержание автомобильных дорог включает в себя защиту от снежных заносов, очистку от снега, борьбу с зимней скользкостью и с наледями для обеспечения бесперебойного и безопасного движения грузового автомобильного транспорта⁵.

В результате исследования практики работы подвижного состава при перевозке грузов в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия]) установлено, что маршруты с подъемами и спусками для грузового подвижного состава являются опасными участками с высоким риском дорожно-транспортных происшествий. Для безопасного преодоления таких участков на колеса крепятся специальные приспособления (рисунок 1).

Для улучшенного сцепления колеса грузового автомобиля с дорогой разработаны различные приспособления, установлены преимущества их использования в сложных климатических условиях⁶.

В результате ранее выполненных исследований установлено, что из конструктивных факторов наибольшее значение на формирование скоростного режима при движении на участках дорог с подъемами и спусками оказывают полная масса автопоезда, мощность двигателя и передаточное отношения трансмиссии [5].

Н. А. Филиппова⁷ отмечает необходимость учета воздействия автомобиля на дорогу через нагрузку, определяемую грузоподъемностью автомобиля; давлением колеса автомобиля на дорогу; частотой повторения нагрузки и динамичности её повторения.

В работах [6, 7] проблему обеспечения безопасности движения грузового автомобильного транспорта в сложных условиях движения предлагается решать за счёт эффективной связи водителей и диспетчеров. Были разработаны системы контроля состояния водителя, которые состоят из камеры в кабине, блока контроля, способного принять решение вместо водителя в экстремальной ситуации [6]; выполнено проектирование инфраструктуры и интеллектуальных систем безопасности транспортных средств [7].

⁴ Скрипченко Е. А., Игнатова О. А. Особенности устройства зимних дорог и переправ // Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: сб. статей 3-й Международ. науч.-техн. конф. Курск: Юго-Западный государственный университет. 2021. С. 345–351

⁵ Золотцев О. А. Содержание дорог в зимний период // Фундаментальные и прикладные проблемы эффективности научных исследований и пути их решения: сб. статей Международ. науч.-практ. конф. Sterlitaмак: ООО «Агентство международных исследований». 2021. С. 89–91.

⁶ Ведринский О. С., Бровченко А. Д., Посохов Д. Н. Повышение проходимости автомобилей в зимнее время года // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: матер. Международ. науч.-практ. конф. Том Часть I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. 2021. С. 116–120.

⁷ Филиппова Н. А., Габышев Т. А. Теоретический анализ дорожной инфраструктуры: повышение интенсивности движения ТС, увеличение транспортной нагрузки и сейсмическое влияние ТС в городах Арктической зоны России // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера: Сборник матер. III всеросс. форума. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова. 2022. С. 207–210.



Рисунок 2 – Съезды грузового подвижного состава с дорог на участках с подъемами и спусками в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха (Якутия))
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Exits of freight rolling stock from roads on sections with ascents and descents in the harsh conditions of the Far North (Republic of Sakha (Yakutia))
Source: compiled by the authors.

Установлено, что перевозка при низких температурах требует адаптации дорожной сети, подвижного состава, труда водителей к сложной работе⁸.

Научно доказана необходимость изменения в конструкции автомобилей, которые предназначены для работы в сложных дорожных условиях^{9,10}.

А. В. Куликов, С. Ю. Фирсова, В. С. Дорохина [8] разработали маршруты перевозок грузов в условиях Крайнего Севера с применением оптимизации при закреплении потребителей за поставщиками. Авторы не исследуют особенности организации безопасного движения на сформированных маршрутах.

P. Intini, P.Colonna, E. O. Ryeng [9] делают вывод о том, что знание особенностей маршру-

ruta перевозок грузов для водителей является важным фактором, влияющим на безопасность движения.

Натурные наблюдения за перевозкой грузов в условиях Крайнего Севера показали, что наличие специальных приспособлений для движения на участках дорог с подъемами и спусками не всегда предотвращают съезды подвижного состава с дороги и их опрокидывание (рисунок 2).

В практике перевозок грузов в условиях Крайнего Севера для предотвращения съездов подвижного состава с дороги и их опрокидывания в качестве тягача используют тракторную технику (бульдозеры KOMATSUD275A-5, Б 10М.6000-1В) (рисунки 3, 4).

⁸ Пономарев Н. А. Некоторые особенности перевозок пассажиров при низкотемпературных условиях. Автомобильные перевозки и транспортная логистика: теория и практика: сб. науч. трудов каф. «Организация перевозок и управление на транспорте» (с международным участием). Омск: СибАДИ. 2021. С. 82–87.

⁹ Бредихин О. И., Михалевич И. Ф. Концепция интеллектуализации тяжелых транспортных средств высокой проходимости // Интеллектуальные транспортные системы: матер. Международ. науч.-практ. конф. Москва: Российский университет транспорта. 2022. С. 85–91.

¹⁰ Коренев А. В., Филиппова Н. А. Новые технологии, устройства и материалы при производстве и эксплуатации автотранспортных средств в сложных климатических условиях // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международ. научно-практ. конф. Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2020. С. 224–228.



Рисунок 3 – Применение тракторной техники в качестве тягача для перемещения грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера (Республика Саха [Якутия])
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Use of tractor machinery as a tractor for the movement of road freight vehicles in the harsh conditions of the Far North (Republic of Sakha (Yakutia))
Source: compiled by the authors.



Рисунок 4 – Пример применения тракторной техники в качестве тягача
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Example of a tractor machinery use as a tractor
Source: compiled by the authors.

Натурные наблюдения за перевозкой грузов в интересах предприятий основного производства по разведке и добыче нефти и газа в суровых условиях Крайнего Севера показали, что применение тракторной техники в качестве тягача для перемещения грузового автомобильного транспорта на маршрутах, где существуют дороги с подъемами и спусками, требует временных затрат. Время на перевозку грузов снижается.

Исследование работ ученых и практиков показало, что внимание уделяется расчету энергозатрат грузового автомобиля при перевозке грузов по автозимникам, в которой учитывается норма расхода топлива, удельная теплота сгорания топлива, расстояние перевозки, грузоподъемность автомобиля и коэффициент её использования¹¹.

В работе [10] предлагается применение имитационной модели, микросимуляционной модели непосредственно для оценки безопасности дорожного движения в неоднородных транспортных средах, без учета временных затрат, которые повлекут за собой мероприятия для организации безопасного дорожного движения.

Для эффективного планирования перевозок грузов предлагается «Инструмент планирования совместной работы», учитывающий функционирование всех участников транспортного процесса [11]. В качестве инструмента для планирования было предложено использовать SWOT-анализ, тем самым оценивать сильные и слабые стороны применения автомобильного транспорта при перевозке [12].

Представленные в настоящей статье исследования отечественных и зарубежных ученых, практических работников показали, что ранее предложенные методы не учитывают затраты времени на реализацию мероприятий по безопасности дорожного движения при перевозке грузов в интересах предприятий основного производства по разведке и добыче нефти и газа в суровых условиях Крайнего Севера. Совершенствование существующих подходов позволит разработать теоретический инструмент для планирования работы подвижного состава при перевозке грузов в суровых условиях Крайнего Севера.

Можно утверждать, что тема настоящего исследования является актуальной.

Целью настоящей статьи является разработка нового теоретического инструментария для планирования работы подвижного состава, позволяющего определить затраты времени на перевозку с применением тракторной техники в качестве тягача, обеспечивающей организацию безопасного дорожного движения грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера.

В статье представлены результаты решения задач по:

- изучению научных трудов, связанных с решением проблем перевозок грузов с учетом особенностей организации дорожного движения при перевозке грузов в особых условиях эксплуатации автомобильного транспорта;
- проведению натурных наблюдений за работой подвижного состава при перевозке грузов на маршрутах, где присутствуют участки дорог с подъемами и спусками;
- определению вероятностных значений времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T на маршрутах при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача;
- определению вероятности использования тракторной техники в качестве тягача на маршрутах перевозок грузов, где движение осуществляется на спусках и подъемах, т.е. вероятности того, что за определенный период времени движение подвижного состава будет осуществляться с применением тракторной техники в качестве тягача;
- разработке рекомендаций для практического применения результатов исследований.

Научная значимость настоящего исследования состоит в разработке теоретического подхода для планирования работы подвижного состава с учетом особенностей организации дорожного движения при перевозке грузов в особых условиях эксплуатации автомобильного транспорта (Республика Саха [Якутия]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При разработке нового теоретического подхода для планирования работы подвижного состава, позволяющего определить затраты времени на перевозку грузов с использованием тракторной техники в качестве тягача, обеспечивающей организацию безопасного дорожного движения при перевозке грузов в суровых условиях Крайнего Севера, применя-

¹¹ Лотышева А. А., Конорева А. А. К вопросу о строительстве и эксплуатации автозимников. Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. матер. IV Национальной науч.-практ. конф. Омск: СибАДИ, 2021. С. 699–703.

ются методы теории вероятностей и математической статистики. В работе [13] доказано, что показатели транспортного процесса являются вероятностными, так как формируются под влиянием большого количества факторов. Методика исследования приведена в работе [14].

При исследовании выполнены натурные наблюдения, количество которых определяется с учетом теории больших чисел. Бесповторная выборка представляет собой общее количество поездок на маршрутах перевозок грузов, где присутствуют участки дорог с подъемами и съездами. В настоящей работе в качестве случайной величины рассматривается число поездок с применением тракторной техники в качестве тягача на маршрутах перевозок грузов, где движение осуществляется на спусках и подъемах. Эта величина может принимать различное значение, которое в точности нельзя предсказать до выполнения натурных наблюдений.

Для определения вероятности возникновения события применяется биномиальный закон распределения и формула Я. Бернулли в связи с тем, что в результате исследований:

- проводится определенное количество наблюдений;
- в результате одного наблюдения может появиться одно из двух противоположных событий: перевозка грузов на спусках и подъемах выполняется с применением тракторной техники в качестве тягача или перевозка грузов на спусках и подъемах выполняется подвижным составом самостоятельно;
- при выполнении указанных условий наблюдаются различные комбинации событий.

При проведении натурных наблюдений были сформированы фотографии рабочего дня водителей, в которых фиксировалось время движения на спусках и подъемах с применением тракторной техники в качестве

тягача. В результате использования методов математической статистики определялся закон распределения случайной величины, значения доверительных интервалов времени движения подвижного состава с учетом доверительной вероятности – 0,95 [23]. Для проверки научной гипотезы по критериям Пирсона и Романовского полученные значения показателя формировались в интервальные вариационные ряды, позволяющие определить статистические характеристики вероятностного показателя. Полуширина доверительных интервалов для математического ожидания времени движения подвижного состава при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача на маршрутах определялась с использованием среднего квадратического отклонения воспроизводимости эксперимента и обращенного значения функции Стьюдента [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Натурные наблюдения за работой подвижного состава IVECO-AMT 733910 С/Т (грузоподъемностью 30 т) проводились с декабря 2021 по март 2022 г. На шести маршрутах при перевозке разборных элементов конструкций и имущества бригад бурения скважин были зафиксированы участки с подъемами и спусками. Перевозка осуществлялась с отработанных площадок разведочного бурения на новые площадки разведочного бурения. На маршрутах ежедневно работали от 36 до 40 ед. подвижного состава грузового автомобильного транспорта.

В таблице 1 представлен вариационный ряд значений времени движения подвижного состава грузового автомобильного транспорта IVECO-AMT 733910 С/Т при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача на маршруте № 1.

Таблица 1

Вариационный ряд значений времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача на маршруте № 1

Источник: составлено авторами.

Table 1

Variation series of IVECO-AMT 733910 C/T rolling stock movement time when transporting goods using tractor equipment as a tractor on route No. 1

Source: compiled by the authors.

№ п/п	Значение, ч	№ п/п	Значение, ч	№ п/п	Значение, ч
1	2	1	2	1	2
1	1,82	7	2,12	13	2,40
2	1,99	8	2,13	14	2,41
3	2,06	9	2,25	15	2,44
4	2,08	10	2,26	16	2,44
5	2,09	11	2,33	17	2,45
6	2,12	12	2,33	18	2,64
				19	3,09

В результате проверки научной гипотезы по критериям Пирсона и Романовского доказано, что время движения подвижного состава грузового автомобильного транспорта IVECO-AMT 733910 C/T при перевозке грузов с применением тракторной техники в качестве тягача на маршруте распределено по нормальному закону.

В таблице 2 представлены результаты исследований при перевозке грузов подвижным составом IVECO-AMT 733910 C/T с применением специальной техники на шести маршрутах.

Величина вероятности (p) использования тракторной техники в качестве тягача, обеспечивающей организацию дорожного движения в

суровых условиях Крайнего Севера на исследуемых маршрутах для планирования работы подвижного состава IVECO-AMT 733910C/T:

- $p_{m1} - 0,31$;
- $p_{m2} - 0,24$;
- $p_{m3} - 0,28$;
- $p_{m4} - 0,26$;
- $p_{m5} - 0,35$;
- $p_{m6} - 0,32$.

Плановые показатели времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T (грузоподъемностью 30 т) с декабря по март на маршрутах перевозки разборных элементов конструкций и имущества бригад бурения скважин представлены в таблице 3.

Таблица 2

Результаты определения затрат времени на перевозку грузов с применением тракторной техники в качестве тягача, обеспечивающей организацию дорожного движения в суровых условиях Крайнего Севера для планирования работы подвижного состава IVECO-AMT 733910 C/T

Источник: составлено авторами.

Table 2

The results of determining the time spent on the transportation for goods using tractor equipment as a tractor that ensures the organization of traffic in the harsh conditions of the Far North for planning the operation of IVECO-AMT 733910 C/T rolling stock

Source: compiled by the authors.

Показатель	Значение по маршрутам					
	1	2	3	4	5	6
Математическое ожидание, ч	2,29	2,46	1,91	2,36	2,24	2,28
Среднее квадратическое отклонение	0,27	0,18	0,33	0,26	0,17	0,19
Верхняя граница доверительного интервала математического ожидания времени движения, ч	3,11	3,01	2,01	3,13	2,76	2,86
Нижняя граница доверительного интервала математического ожидания времени движения, ч	1,74	2,09	1,23	1,84	1,89	1,90

Таблица 3

**Плановые показатели времени движения подвижного состава
IVECO-AMT 733910 С/Т (грузоподъемностью 30 т) с декабря по март на маршрутах перевозки
разборных элементов конструкций и имущества бригад бурения скважин**
Источник: составлено авторами.

Table 2

**Planned time of Movement of IVECO-AMT 733910 C/T rolling stock (30 tons of load capacity)
from December to March on the routes for transportation of demountable
structures and property of well drilling crews**
Source: compiled by the authors.

Показатель	Значение по маршрутам					
	1	2	3	4	5	6
Максимальное время движения, ч	0,96	0,72	0,56	0,81	0,97	0,92
Минимальное время движения, ч	0,54	0,50	0,34	0,48	0,66	0,61

Значения получены как произведения затрат времени (см. таблицу 2) и вероятности возникновения события. Например, на маршруте 1 плановые показатели времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 С/Т (грузоподъемностью 30 т) с декабря по март на маршрутах перевозки разборных элементов конструкций и имущества бригад бурения скважин: $3,11 \cdot 0,31 = 0,96$ ч и $1,74 \cdot 0,31 = 0,54$ ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель, поставленная в научной статье, достигнута за счет решения задач, позволяющих получить следующие научные знания:

- установлены вероятностные значения времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 С/Т в результате натурных наблюдений и доказано, что функция распределения значений показателя соответствует нормальному закону;

- определены вероятности применения тракторной техники в качестве тягача на маршрутах перевозок грузов, где движение осуществляется на спусках и подъемах.

Результаты исследований, представленные в настоящей статье, позволили совершенствовать существующие научные положения планирования работы подвижного состава, представленные в ранее изученных научных трудах в части применения научных методов для определения времени, необходимого для организации дорожного движения при перевозке грузов в особых условиях эксплуатации автомобильного транспорта.

Для практического применения определены значения времени движения подвижного состава IVECO-AMT 733910 С/Т при перевозке грузов с использованием тракторной техники в качестве тягача на шести маршрутах. По-

казатели могут быть использованы в период с декабря по март при перевозке разборных элементов конструкций, имущества бригад бурения скважин и прочих грузов в интересах предприятий основного производства по разведке и добыче нефти и газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вахрушев С. А., Трофимов Б. С., Трофимова Л. С. Математическое моделирование производственных показателей работы подвижного состава с учётом условий Крайнего Севера // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 4. С. 104–115. DOI: 10.25198/2077-7175-2022-4-104.
2. Лолаев А. Б., Масланов Н. А., Панченко Т. В. [и др.] Оценка геозкологических факторов при эксплуатации горных дорог в зимних условиях // Sciences of Europe. 2021. № 64-2(64). С. 64–68. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-64-2-64-68.
3. Эшанбабаев А. А., Рахимов Р. Ш., Хабибуллаев Д. Х. Безопасность движения транспортных средств на спусках и подъемах на горных дорогах // Universum: технические науки. 2022. № 5-5(98). С. 64–66. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13602.
4. Сунгатуллина К. А. Влияние эксплуатационного состояния автомобильных дорог на безопасность дорожного движения // Вестник НЦБЖД. 2021. № 2(48). С. 118–122.
5. Давлятов У. Р., Акматбеков Б. М. Метод расчета движения грузового автомобиля в горных условиях // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2019. № 7. С. 47–51.
6. Бабаева Ю. А., Волкова М. В. Проблемы транспортировки грузов в условиях Крайнего Севера // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2019. № 1. С. 6–11.
7. Singh H., Kathuria A. Analyzing driver behavior under naturalistic driving conditions // Accident Analysis & Prevention. 2021. Т. 150. С. 105908. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105908.
8. Куликов А. В., Фирсова С. Ю., Дорохина В. С. Повышение эффективности автомобильных перевозок в условиях Крайнего Севера Рос-

сийской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 3(79). С. 286–305. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305.

9. Intini P., Colonna P., Ryeng E. O. Route familiarity in road safety: A literature review and an identification proposal // *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. 2019. Т. 62. С. 651-671. DOI: 10.1016/j.trf.2018.12.020.

10. Mahmud S. M. S. et al. Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment // *IATSS research*. 2019. Т. 43. №. 1. С. 27-36. DOI: 10.1016/j.iatssr.2018.07.002.

11. Allaoui H., Guo Y., Sarkis J. Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Т. 229. С. 761-774. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.367.

12. Kurenkov P. et al. Study of the current state of the transport infrastructure of road and rail transport of the Russian Federation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. Т. 698. №. 6. С. 066064. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066064.

13. Трофимова Л. С., Певнев Н. Г. Структура методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия // *Вестник СибАДИ*. 2017; (6(58)):63-71. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71)

14. Трофимова Л. С. Методика текущего планирования работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе // *Вестник СибАДИ*. 2020; 17(2):234-247. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

REFERENCES

1. Vahrushev S. A., Trofimov B. S., Trofimova L. S. Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh pokazatelej raboty podvizhnogo sostava s uchyotom uslovij Krajnego Severa [Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh pokazatelej raboty podvizhnogo sostava s uchyotom uslovij Krajnego Severa]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2022; 4: 104-115. DOI: 10.25198/2077-7175-2022-4-104. (In Russ.)

2. Lolaev A. B., Maslanov N. A., Panchenko T. V. [i dr.]. Ocenka geoekologicheskikh faktorov pri ekspluatatsii gornyh dorog v zimnih usloviyah [Assessment of geoecological factors in the operation of mountain roads in winter conditions]. *Sciences of Europe*. 2021; 64-2(64): 64-68. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-64-2-64-68. (In Russ.)

3. Eshanbabaev A. A., Rahimov R. SH. u., Habibullaev D. H. u. Bezopasnost' dvizheniya transportnyh sredstv na spuskah i pod'emah na gornyh dorogah [Safety of vehicles on slopes and ascents on mountain roads]. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022; 5-5(98): 64-66. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13602. (In Russ.)

4. Sungatullina K. A. Vliyanie ekspluatatsionno-gosostoyaniya avtomobil'nyh dorog na bezopasnost'

dorozhnogo dvizheniya [Impact of the operational condition of motor roads on road safety]. *Vestnik NCBZHD*. 2021; 2(48): 118-122. (In Russ.)

5. Davlyatov U. R., Akmatbekov B. M. Metod rascheta dvizheniya gruzovogo avtomobilya v gornyh usloviyah [Method of calculating truck traffic in mountainous conditions]. *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*. 2019; 7: 47-51. (In Russ.)

6. Babaeva YU. A., Volkova M. V. Problemy transportirovki gruzov v usloviyah Krajnego Severa [Problems of cargo transportation in the Far North]. *Transport i mashinostroenie Zapadnoj Sibiri*. 2019; 1: 6-11. (In Russ.)

7. Singh H., Kathuria A. Analyzing driver behavior under naturalistic driving conditions. *Accident Analysis & Prevention*. 2021; Т. 150: 105908. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105908.

8. Kulikov A. V., Firsova S. Y., Dorokhina V. S. Improving efficiency of car transportation in extreme north conditions in russian federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(3):286-305. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305>

9. Intini P., Colonna P., Ryeng E. O. Route familiarity in road safety: A literature review and an identification proposal. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. 2019; Т. 62: 651-671. DOI: 10.1016/j.trf.2018.12.020.

10. Mahmud S. M. S. et al. Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment. *IATSS research*. 2019; Т. 43. №. 1: 27-36. DOI: 10.1016/j.iatssr.2018.07.002.

11. Allaoui H., Guo Y., Sarkis J. Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2019; Т. 229: 761-774. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.367.

12. Kurenkov P. et al. Study of the current state of the transport infrastructure of road and rail transport of the Russian Federation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019; Т. 698. №. 6: 066064. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066064

13. Trofimova L. S., Pevnev N. G. Structure of methodology of current planning of work of cargo transport enterprise. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (6(58)):63-71. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71)

14. Trofimova L. S. The methodology of the current planning of a motor transport enterprise operation for the transportation of goods in the city. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2):234-247. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трофимова Л. С. Обзор исследований по существующим подходам к планированию работы подвижного состава с учетом особенностей организации дорожного движения при перевозке грузов в

условиях Крайнего Севера; разработка материалов и методов для исследований (40%).

Вахрушев С.А. Формулировка цели и задач исследования, основных выводов; проведение эксперимента и обработка результатов (60%).

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Liudmila S. Trofimova Review of studies on existing approaches to planning the work of rolling stock, taking into account the peculiarities of the organization of traffic in the transportation of goods in the Far North; development of materials and methods for research (40%).

Sergey A. Vakhrushev Formulation of the purpose and objectives of the study, the main conclusions; conducting an experiment and processing the results (60%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность движения», SPIN-код: 6711-9953.

Вахрушев Сергей Александрович – аспирант, SPIN-код: 9543-4668.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Liudmila S. Trofimova – Dr. of Sci., Head of the Transport Management and Traffic Safety Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) e-mail: trofimova_ls@mail.ru, SPIN-код: 6711-9953.

Sergey A. Vakhrushev – Graduate student, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), SPIN-код: 9543-4668.

Научная статья
УДК 629.3.017
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>
EDN: SOGIJI



МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

Н. В. Хольшев*, А. Ю. Конев, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров

Тамбовский государственный технический университет
г. Тамбов, Россия

xhb@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8468-6593>,
konev.a1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-1120>,
serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>,
prohorov.av@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-6193>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Безопасность дорожного движения во многом определяется техническим состоянием транспортного средства, а особенно системы управления. К ним относится и тормозная система. Для повышения ее эффективности сейчас широко применяются различные вспомогательные электронные системы. Эти системы осуществляют управление автомобилем через колесные тормозные механизмы. Составляющим элементом колесного тормозного механизма фрикционного типа являются тормозные колодки. От их качества зависит эффективность работы тормозной системы автомобиля вне зависимости от наличия вспомогательных электронных систем. Применение тормозных колодок с большим разбросом значений коэффициентов трения может оказать существенное влияние на эффективность торможения.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика их проведения и обработки экспериментальных данных, а также изготовлена лабораторная установка. В качестве приборной составляющей стенда для преобразования механических перемещений в электронный сигнал использовали аналого-цифровой преобразователь ArduinoUno R3.

Результаты. В соответствии с предложенной методикой были выполнены испытания четырех пар тормозных колодок. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что разность значений коэффициентов трения тормозных колодок может вызвать различие в величине тормозных сил на колесах от 8 до 19%.

Обсуждение и заключение. Разность коэффициентов трения тормозных колодок оказывает существенное влияние на величину тормозных сил и устойчивость автомобиля при торможении. Одной из причин этого может являться низкое качество материала колодок или нарушение условий эксплуатации. Предложенная усовершенствованная методика определения коэффициентов трения скольжения позволяет получать более точные значения за счет применения аналого-цифрового преобразователя, уменьшая влияние точности измерительных инструментов и человеческого фактора на результат измерения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозной механизм, тормозные колодки, коэффициент трения, курсовая устойчивость, тормозная сила, автомобиль

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов выражает благодарность рецензентам, работавшим над данной статьей, за ценные замечания по доработке статьи.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022; одобрена после рецензирования 31.10.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Хольшев Н. В., Конев А. Ю., Ведищев С. М., Прохоров А. В. Методика и результаты экспериментального определения коэффициентов трения некоторых автомобильных тормозных колодок // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 114-124. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>

© Хольшев Н. В., Конев А. Ю., Ведищев С. М., Прохоров А. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>
EDN: SOGIJI

METHOD AND RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENTS OF SOME AUTOMOBILE BRAKE SHOE

Nikolai V. Holshev*, Andrei Y. Konev, Sergei M. Vedishchev, Aleksei V. Prokhorov

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

*xhb@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8468-6593>,
konev.a1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-1120>,
serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>,
prohorov.av@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-6193>*

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. Road safety is largely determined by the technical condition of the vehicle, and especially control systems. The braking system is one of them. To improve its efficiency, various assistive electronic systems are now widely used. These systems control the vehicle through wheel braking mechanisms. Brake pads are a constituent element of a friction-type wheel brake mechanism. The efficiency of the vehicle braking system depends on its quality, regardless of the presence of auxiliary electronic systems. The use of brake pads with a wide spread of friction coefficients can have a significant impact on braking performance.

Materials and methods. To conduct experimental studies, a methodology for conducting them and processing experimental data was developed, as well as a laboratory setup was made. Arduino Uno R3 analog-to-digital converter was used as an instrumental component of the stand for converting mechanical movements into an electronic signal.

Results. In accordance with the proposed methodology, four pairs of brake pads were tested. As a result of processing the experimental data, it was found that the difference in the values of the friction coefficients of the brake pads can cause a difference in the magnitude of the braking forces on the wheels from 8 to 19%.

Discussion and conclusions. The difference in the coefficients of friction of the brake pads has a significant impact on the magnitude of the braking forces and the stability of the vehicle during braking. One of the reasons for this may be the poor quality of the pad material or a violation of operating conditions. The proposed improved technique for determining the coefficients of sliding friction makes it possible to obtain more accurate values through the use of an analog-to-digital converter, reducing the influence of the accuracy of measuring instruments and the human factor.

KEYWORDS: brake mechanism, brake pads, coefficient of friction, directional stability, braking force, car

ACKNOWLEDGMENTS: the team of the authors is grateful to the reviewers who worked on this article for their insightful comments on the revision of the article.

The article was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 31.10.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Holshev N. V., Konev A. Yu., Vedishchev S. M., Method and results of experimental determination of friction coefficients of some automobile brake shoe. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 114-124. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>

© Holshev N. V., Konev A. Y., Vedishchev S. M., Prokhorov A. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Автомобиль состоит из множества деталей, механизмов, агрегатов и систем, различно влияющих на безопасность дорожного движения. К системам, критически влияющим на устойчивость автомобиля, относится и тормозная система. Надежная и эффективная ее работа обеспечивает устойчивость автомобиля при всех режимах торможения, исключая выход его из коридора движения и уменьшая вероятность ДТП [1]. Многие научные исследования направлены на повышение устойчивости транспортного средства при торможении [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Основным направлением повышения эффективности процесса торможения автомобиля без выхода его из коридора движения является применение различных вспомогательных электронных систем [16, 17]. Наиболее распространенной из таких систем является антиблокировочная система ABS (anti-lockbrakingsystem), которая исключает блокировку колес при торможении, не допуская их проскальзывание, причем выполняет это в автоматическом режиме, избавляя водителя от необходимости осуществлять прерывистое торможение [12]. Ее применение позволяет сохранить управляемость автомобиля при торможении, снижая влияние на эффективность торможения опыта водителя [18]. Развитием данной системы стало внедрение дополнительно к ней системы распределения тормозных усилий EBD (Electronic Brakeforce Distribution). Данная система позволяет исключить блокировку колес путем перераспределения тормозных сил между колесами. Совершенствование антиблокировочной системы ведется постоянно, совершенствуется алгоритм работы системы, изменяется ее компонентный состав [12, 19 20, 21, 22, 23]. Это позволяет подстроить ее под новые требования к безопасности и конструкции транспортных средств. На базе антиблокировочной системы разработана система курсовой устойчивости ESP (Electronic Stability Program), обеспечивающая устойчивое движение автомобиля за счет подтормаживания нужного колеса. С появлением электропривода и гибридного привода стали исследоваться и внедряться принципы и технологии рекуперативного торможения, которое не исключает необходимость применения классических фрикционных тормозных механизмов на транспортных средствах, особенно для экстренного торможения [12].

Применение электронных систем облегчает управление автомобилем, повышает его устойчивость и управляемость, но снижает общую надежность транспортного средства в целом и тормозной системы в частности, снижая ее ресурс [24], увеличивает стоимость приобретения, обслуживания и ремонта автомобиля. Кроме того, они вызывают излишнюю уверенность в своих возможностях у водителя, ведущую к более агрессивному стилю вождения и повышению вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий [24].

Каким бы ни был совершенным электронный «помощник», встроенный в тормозную систему автомобиля, он будет малоэффективен при низкой надежности и эффективности работы тормозного механизма. Наибольшее распространение сейчас имеют тормозные механизмы фрикционного типа, создающие тормозной момент за счет прижатия тормозных накладок к поверхности тормозного диска или барабана. Если величины коэффициентов трения в тормозных механизмах разных колес автомобиля будут существенно отличаться, то это приведет к возникновению поворачивающего момента [6] и выходу транспортного средства из коридора движения. В случае если на автомобиле ABS работает в штатном режиме, она исправит данную ситуацию, не допустив блокировку колеса с наиболее высоким тормозным моментом. Величина тормозного момента на колесе для дискового тормозного механизма линейно (для барабанного почти линейно) зависит от значения коэффициента трения между тормозной колодкой и тормозным диском. Величина данного коэффициента трения зависит в основном от свойств и состояния тормозной накладки. Известно, что даже в пределах одного уровня трения колодки могут иметь существенную разницу значений коэффициента трения. Неравномерность значений коэффициентов трения может быть вызвана плохой приработкой колодок, их замасливанием, воздействием воды, нестабильностью значений коэффициентов трения накладок при нагреве, заеданием механических частей тормозных механизмов, низким качеством материала накладок, применением фальсифицированной продукции. Это фактически означает постоянное «вмешательство» в процесс торможения электронных «помощников», что негативно сказывается на ресурсе элементов тормозной системы [24].

Вопросам изучения влияния разности тормозных сил по бортам автомобиля на его устойчивость при торможении посвящен ряд работ^{1,2} [4, 6, 7, 13, 25, 26]. Наиболее полные результаты исследований по данной тематике изложены в монографии А. А. Ревина [13]. Представленные в ней данные указывают на то, что разность коэффициентов трения тормозных накладок разных партий может привести к неравномерности тормозных сил по бортам автомобиля до 44% (на момент издания монографии, 2002 год). Воздействие эксплуатационных факторов на тормозные накладки дополнительно может привести к неравномерности тормозных сил для легковых автомобилей от 44–55% [13]. Более новых данных о разности значений коэффициентов трения современных тормозных колодок, возникающей при производстве и их эксплуатации, при литературном поиске среди открытых источников найдено не было. Между тем требования к качеству и долговечности тормозных накладок с годами возрастают, также изменяются составы, применяемые при их производстве. Поэтому одной из задач проводимых исследований стало экспериментальное определение ориентировочной разности коэффициентов трения применяемых в настоящее время тормозных колодок, причем с минимальными финансовыми затратами на подготовку и проведение экспериментов.

С учетом задачи и условий проведения исследований (применение минимального количества измерительного оборудования, снижение влияния человеческого фактора при проведении измерений, минимальные финансовые затраты при удовлетворительной точности) был произведен анализ существующих методов определения коэффициента трения скольжения. В настоящее время существует несколько таких способов, отличающихся степенью точности и сложностью необходимого оборудования³ [27]. Наиболее доступными и простыми являются три метода.

Первый – «движение тела по горизонтальной поверхности»³. Его суть заключается в экспериментальном определении минимальной силы F , которую необходимо приложить к бруску известной массы m , для равномерного его перемещения по горизонтальной поверхности. Величина коэффициента трения в этом случае может быть найдена по формуле

$$\mu_1 = \frac{F}{mg}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Как видно из формулы (1), при этом методе необходимо производить с достаточной точностью измерение двух физических величин – массы и силы, следовательно, нужно иметь для этих целей соответствующее оборудование высокой точности, кроме того, чем больше применяется измерительного оборудования, каждое из которых имеет некоторую погрешность, тем выше будет итоговая погрешность измерения.

Вторым методом определения коэффициента трения скольжения является метод «наклонной плоскости»³. Его суть заключается в определении минимального угла наклона α некоторой опорной площадки, при котором тело, расположенное на ней, будет под действием силы тяжести соскальзывать с нее. В этом случае коэффициент трения будет равен

$$\mu_2 = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при таком методе нужно измерить только одну физическую величину, но точность измерения будет во многом зависеть от того, каким образом будет определяться угол наклона опорной площадки. Самым доступным средством измерения угла является транспортир, но точность измерений будет с минимальной ошибкой в $\pm 0,5^\circ$, а фактически еще больше из-за человеческого фактора.

¹ Тарасов Ю.В. Улучшение эксплуатационных свойств легковых автомобилей совершенствованием методики выбора тормозных колодок: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. Харьков, 2007. 168 с.

² Конев А. Ю., Хольшев Н. В. Влияние фрикционных свойств тормозных колодок на устойчивость автомобиля при торможении // Современная наука: Теория, методология, практика: матер. IV Всероссийской нац. науч.-практ. конф. (Тамбов, 20–апреля 2022 г.) Тамбов, 2022. С. 196–198.

³ Лабораторная работа М-19. Определение коэффициентов силы трения скольжения [Электронный ресурс]. URL: https://file.ineo.tpu.ru/VLabs/PHYSICS_mechanics_01/Lab2/theory.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

Третий метод определения величины коэффициента трения называется «метод рейсшины»⁴. При определении коэффициента трения данным способом используют линейку, перемещающуюся вдоль направляющей и расположенную под некоторым углом к ней. Брусок из исследуемого материала непосредственно контактирует с линейкой и перемещается вдоль нее при движении линейки относительно направляющей. Зная начальное и конечное положение центра масс бруска, находят величину коэффициента трения между линейкой и бруском при равномерном перемещении линейки. Его значение равно отношению расстояния, которое пройдет центр масс бруска вдоль линейки (расстояние l_1) к величине перпендикуляра (расстояние l_2), проведенного к линейке через начальное положение центра масс бруска до пересечения с прямой, параллельной линейке, проходящей через новое положение центра масс бруска

$$\mu_3 = \frac{l_1}{l_2}. \quad (3)$$

Данный способ также не требует специализированного оборудования, но требует нахождения центра масс и устойчивого положения исследуемого бруска, что в случае с тормозными колодками затруднительно и приведет к снижению точности определения коэффициента трения скольжения.

С учетом проведенного анализа методов определения коэффициентов трения скольжения и учетом возможностей имеющегося оборудования, финансовых возможностей в качестве базового для проведения исследований был выбран метод «наклонной плоскости» как наиболее просто реализуемый. Для повышения его точности и уменьшения влияния человеческого фактора при считывании данных было решено автоматизировать данный процесс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с выбранным методом определения коэффициента трения скольжения для проведения поисковых экспериментов была изготовлена лабораторная установка, представленная на рисунке. Она состоит из основания 1, к которому через опоры 2 подвижно присоединен вал 3, жестко

соединенный с поворотной платформой 4, с закрепленным на ней при помощи зажимов 5 абразивным материалом (на фото – шлифовальная сетка). Применение данных зажимов позволяет удерживать сетку неподвижно относительно поворотной площадки с усилием более 45Н (данная величина определялась экспериментально), что значительно больше силы от воздействия тормозной колодки. Поворот платформы 4 осуществляется при помощи вала 6 вращением ручки 7. Для определения угла поворота платформы 4 с валом 3 жестко связана ручка потенциометра 8, который через уголок 9 закреплен к основанию 1. Для считывания текущих значений сопротивления к потенциометру через три провода 10 подсоединена плата ArduinoUno R3 11 [28], которая в свою очередь подключается к персональному компьютеру через USB разъем 12 и в которую загружен скетч AnalogReadSerial. Каждому значению сопротивления потенциометра будет соответствовать условное число, изменяющееся от нуля до 1023 [28]. Просмотр этих чисел в реальном времени осуществляется через монитор порта, который открывается через приложение Arduino.

Центральный разъем потенциометра 8 присоединен через желтый провод к аналоговому входу «A0» платы ArduinoUno R3, а белый и синий провода к разъемам GND и «питание 5В» соответственно. Для тарировки значений использовался оптический дальномер «SW-S50» 13 функцией измерения углов с точностью до десятых долей градуса.

Тарировка осуществлялась следующим образом. Включался дальномер 13 (см. рисунок) и устанавливался подошвой на поворотную платформу 4. Затем для удобства вычислений вращением вала 6 через рукоять 7 выставлялся целый угол поворота платформы через показания дальномера. Этому значению соответствовало некоторое значение на мониторе порта. Оно записывалось. Затем осуществлялся подъем платформы на 10°, и снова записывалось значение с монитора порта. Для повышения точности тарировка производилась с пятикратной повторностью. За результат было взято среднее значение. После обработки данных было установлено, что повороту платформы 4 на 1° соответствует изменение показаний на мониторе порта в 4,9 единицы.

⁴ Лабораторная работа М-19. Определение коэффициентов силы трения скольжения [Электронный ресурс]. URL: https://file.ineo.tpu.ru/VILabs/PHYSICS_mechanics_01/Lab2/theory.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

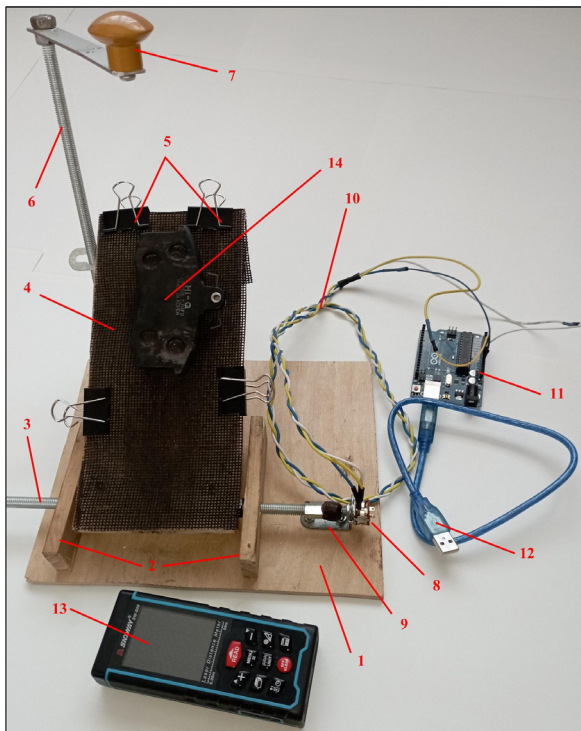


Рисунок – Лабораторная установка для определения коэффициента трения скольжения автомобильных тормозных колодок
Источник: составлено авторами.

Figure – Laboratory setup for determining the slip detection coefficient of automotive brake pads
Source: compiled by the authors

Определение коэффициентов трения скольжения тормозных колодок осуществлялось следующим образом (см. рисунок). Потенциометр подключался через плату ArduinoUno R3 к персональному компьютеру. Загружалось приложение Arduino и открывался монитор порта. Перед началом испытаний колодка «притиралась» к абразивной сетке путем нескольких перемещений по ней с небольшим усилием. Шлифовальная сетка менялась после испытаний каждой колодки. Использовалась сетка с зерном № 180. Затем вращением рукоятки 7 осуществлялось опускание платформы 4, до тех пока лежащая на ней колодка 14 не соскальзывала с нее. После этого, расположив колодку рядом с краем верхних зажимов 5, медленно вращая вал 6 через рукоять 7, осуществлялся подъем платформы до тех пор, пока колодка не соскальзывала с нее. Для данного положения платформы про-

изводилась фиксация значения монитора порта. Опыты повторялись с каждой колодкой по пять раз.

Экспериментальные значения коэффициентов трения для i -й колодки определялись по формуле

$$\mu_i = \operatorname{tg}(\alpha_{\max}^T - \frac{R_i - R_{\max}^T}{k}), \quad (4)$$

где $\alpha_{\max}^T$ – значение максимального тарировочного угла, градусы; $R_{\max}^T$ – значение сопротивления потенциометра, соответствующее $\alpha_{\max}^T$, условные единицы; R_i – экспериментальное значение сопротивления потенциометра для i -й колодки, условные единицы; k – тарировочный коэффициент, количество условных единиц сопротивления потенциометра, приходящихся на один градус поворота платформы, усл. ед./градус.

$$k = \frac{R_{\max}^T - R_{\min}^T}{\alpha_{\max}^T - \alpha_{\min}^T}, \quad (5)$$

где $\alpha_{\min}^T$ – значение минимального тарировочного угла, градусы; $R_{\min}^T$ – значение сопротивления потенциометра, соответствующее $\alpha_{\min}^T$, условные единицы.

Расчет фактической разницы коэффициентов трения разных колодок осуществлялся по формулам:

- в абсолютных значениях:

$$\Delta\mu_{ij}^A = \mu_{\max}^i - \mu_{\min}^j, \quad (6)$$

- в относительных единицах, %:

$$\Delta\mu_{ij}^O = 100 \frac{\mu_{\max}^i - \mu_{\min}^j}{0,5(\mu_{\max}^i + \mu_{\min}^j)} \quad (7)$$

где $\Delta\mu_{ij}^A$ – абсолютное отклонение коэффициента трения i -й колодки относительно j -й; $\Delta\mu_{ij}^O$ – абсолютное отклонение коэффициента трения i -й колодки относительно j -й; $\mu_{\max}^i$ – экспериментальное значение коэффициента трения i -й колодки, имеющей больший коэффициент трения; $\mu_{\min}^j$ – экспериментальное значение коэффициента трения j -й колодки, имеющей меньший коэффициент трения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования производились на четырех парах колодок. Первые две пары колодок использовались на передних тормозных механизмах автомобиля ВАЗ-21043, причем обе пары достигли предельного износа. Третья пара колодок и четвертая использовались на передних тормозных механизмах ВАЗ-2109 и имеют допустимый износ накладок. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что результаты повторных опытов в одной серии отличаются больше для колодок, достигших предельного

износа – разброс значений от 8 до 10 условных единиц, что может говорить о нестабильности значений коэффициента трения для изношенных колодок. Для колодок третьей и четвертой пар, имеющих допустимый износ, разброс составил от 4 до 5 условных единиц, что может косвенно говорить о большей стабильности значений коэффициента трения. Также следует отметить, что разность средних значений для каждой пары колодок варьируется в пределах от 10 до 15 условных единиц. Большие значения характерны для четвертой пары колодок. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 2.

Таблица 1
Результаты экспериментов
Источник: составлено авторами.

Table 1
Experimental results
Source: compiled by the authors.

Номер замера	Первая пара колодок		Вторая пара колодок		Третья пара колодок		Четвертая пара колодок	
	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка
1	917	936	944	928	942	930	970	957
2	927	931	938	926	938	933	968	955
3	924	933	939	925	942	931	968	955
4	917	927	938	930	937	931	972	957
5	923	932	935	933	937	929	973	953
Средние значения	921,6	931,8	938,8	928,4	939,2	930,8	970,2	955,4

Таблица 2
Результаты обработки экспериментальных данных
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of experimental data processing
Source: compiled by the authors.

Номер замера	Первая пара колодок		Вторая пара колодок		Третья пара колодок		Четвертая пара колодок	
	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка
Угол поворота платформы, ° α_i	28,87	26,80	25,37	27,49	25,28	27,00	18,96	21,98
Значение коэффициента трения, μ_i	0,55	0,505	0,47	0,52	0,47	0,51	0,34	0,40
Абсолютная разность коэффициентов трения	0,045		0,05		0,04		0,06	
Относительная разность коэффициентов трения, %	8,53		10,10		8,16		16,21	
Относительная разность тормозных сил, %	7,86		11,24		8,89		19,35	

Из таблицы 2 видно, что абсолютная разность значений коэффициентов трения находится в интервале от 0,04 до 0,06, а относительная – от 8,16 до 16,21%. С учетом линейной зависимости тормозной силы от величины коэффициента трения в дисковом тормозном механизме можно считать, что и ее величина будет изменяться в этих пределах (от 1,08 до 1,16 раза), создавая неравномерность сил на колесах. Для колес с дисковыми тормозными механизмами относительная разность тормозных сил колес оси допускается до 20% и вычисляется по формуле⁵ [5]:

$$\delta = 100 \left| \frac{P_{T \text{ пр.}} - P_{T \text{ лев.}}}{P_{T \text{ max}}} \right|, \quad (8)$$

где $P_{T \text{ пр.}}$, $P_{T \text{ лев.}}$ – тормозные силы на правом и левом колесах проверяемой оси АТС, Н; $P_{T \text{ max}}$ – наибольшая из указанных тормозных сил, Н.

Расчеты, выполненные по формуле (8) и приведенные в таблице 2, показывают, что полученные отклонения укладываются в двадцатипроцентный допуск. Но на все остальные факторы, влияющие на равномерность тормозных сил, в таком случае остается около 10%, а для четвертой пары колодок всего 1%. Это ведет к увеличению числа срабатываний вспомогательных электронных систем, а если они отсутствуют или неисправны, то растет и вероятность возникновения заноса при торможении и создании аварийной ситуации.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка результатов испытаний показывает, что относительная разность тормозных сил из-за различия коэффициентов трения, по результатам экспериментальных исследований, для испытываемых колодок находится в интервале от 8 до 19%. Это значительно снижает допуск на остальные параметры, негативно влияющие на значения тормозных сил, а значит и на устойчивость автомобиля при торможении. Предложенная усовершенствованная методика определения коэффициентов трения скольжения, предусматривающая применение аналогово-цифрового преобразователя, позволяет с большей точностью производить измерения за счет уменьшения влияния человеческого фактора и точности измерительного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хольшев Н. В., Коновалов Д. Н., Лавренченко А. А. Уточненная методика расчета курсовых углов автомобиля в конце торможения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 86–95.
2. Балакина Е. В., Сергиенко И. В. Методика выбора размеров колёс на разных осях автомобиля с АБС по критерию улучшения траекторной устойчивости при торможении // Автомобильная промышленность. 2022. № 1. С. 12–15.
3. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля: монография. М.: Машиностроение. 1971. 416 с.
4. Ревин А. А., Комаров Д. Ю. Неравномерность действия тормозных механизмов и ее влияние на рабочий процесс тормозной системы автомобиля с АБС // Автомобильная промышленность. 2009. № 12. С. 19–20.
5. Быков В. В. Экспериментальные исследования устойчивости автомобиля категории М1 при неравномерном действии тормозных сил // Вести автомобильно-дорожного института. 2019. № 4 (31). С. 11–20.
6. Подригало М. А., Холодов М. П. Влияние распределения тормозных сил между осями на устойчивость колесных машин при заносе // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2011. № 29. С. 11–17.
7. Подригало М. А., Волков В. Л., Доброгорский М. В. Оценка устойчивости автомобиля при опережающем блокировании задних колёс в процессе торможения // Автомобиле- и тракторостроение. Вестник НТУ «ХПИ». 2004. № 2. С. 101–109.
8. Подригало М. А., Карпенко В. А. Неравномерность вертикальных реакций на колёсах автомобиля и его устойчивость при торможении // Автомобильная промышленность. 2001. № 2. С. 19–21.
9. Подригало М. А., Туренко А. И. Оценка устойчивости автомобиля при действии возмущений в процессе служебных торможений // Вестник ХНАДУ. 2015. № 69. С. 40–44.
10. Schick B., Bunz D. Fahrzeug-Gierstabilität bei Kurvenbremsen auf hohen Geschwindigkeiten // Automobiltechnische Zeitschrift. 2004. Vol. 106. Iss. 11. P. 988–994.
11. Pacejka H.B., Tyre and Vehicle Dynamics. Burlington: Butterworth-Heinemann. 2006. P. 657.
12. Andrew Day. Braking of Road Vehicles. Butterworth-Heinemann. 2014. P. 488 <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07386-6>.
13. Ревин А. А. Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: монография. Волгоград: ВолГТУ, 2002. 372 с.
14. Балакина Е. В., Зотов Н. М., Федин А. П. Особенности компьютерного моделирования в реальном времени процесса торможения авто-

⁵ Организация государственного учета и инструментальный контроль технического состояния автомобилей: методические указания / Е. Ю. Носов, Е. А. Лысенко [и др.]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 66 с.

мобильного колеса. Мехатроника, автоматизация, управление. 2015;16(3):174-182. <https://doi.org/10.17587/mau.16.174-182>.

15. Федотов А. И. Влияние работы ABS на тормозную эффективность и устойчивость автомобиля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8(79). С. 130–133.

16. Иванов А. М., Кристальный С. Р., Попов Н. В. Системы автоматического экстренного торможения: монография. М.: МАДИ, 2018. 180 с.

17. Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом тормозном управлении транспортных средств: монография / А. Н. Туренко, В. И. Клименко, В. А. Богомолов [и др.]. Харьков: ХНАДУ. 2015. 450 с.

18. Khorasani-Zavareh D., Shoar S., Saadat S. Antilock braking system effectiveness in prevention of road traffic crashes in Iran// BMC public health. May 2013. Vol. 13(1): 1-6.: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-439>

19. Soni A., Jitendra Dr. Anti-Lock Braking System// International Journal of Innovative Research in Engineering & Management. February 2022. Vol.9, Iss. 1: 248-252.: <https://doi.org/10.55524/ijirem.2022.9.1.48>

20. Beles H., Rus A., Dragomir G., Mitran T., Trusca D., Tolea B. Researches Regarding the Continuous Improvement of the ABS (Anti-Lock Braking System) Operation for the Passenger Cars// 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. January 2016.: 196-205.: <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.027>

21. Жилейкин М. М., Чугунов Д. С. Алгоритм работы антиблокировочной системы для двухосных автомобилей с одной ведущей осью с адаптивным перераспределением тормозных усилий// Известия МГТУ «МАМИ». 2021. Том 15, № 2. С. 93 – 100.: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-93-100>.

22. Горшков Ю. Г., Калугин А. А., Старунова И. Н., Житейко И. С. Антиблокировочная тормозная система колесных машин с пневматическими тормозными устройствами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 4 (114). С. 133–138.

23. Ashraf Sh., Sharkawy Abdel-Nasser, Moaaz Ah., Ghazaly N. A. Comparative Study of Different Control Methods for Anti-Lock Braking System (ABS)// SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications. June 2021. Vol.2 (1): 27-34.: <https://doi.org/10.21608/svusrc.2021.65855.1007>

24. Ревин А. А., Полуэктов М. В., Радченко М. Г. ABS и ресурс элементов тормозной системы // Автомобильная промышленность. 2009. № 10. С. 39–40.

25. Подригало М. А., Тарасов Ю. В. Методика рационального выбора фрикционных пар передних и задних тормозов автомобилей по температурным характеристикам // Автомобильный транспорт. 2004. № 15. С.13–17.

26. Ревин А. А., Комаров Д. Ю., Дедов С. С. Влияние на рабочий процесс тормозной системы легкового автомобиля с ABS явления снижения

коэффициента трения пары «тормозная колодка – тормозной диск» // Автотранспортное предприятие. 2008. № 4. С. 49–51.

27. Определение коэффициента трения скольжения методом гармонических колебаний / Н. К. Корнеева, Л. Н. Пичугова, Е. В. Глушкова [и др.] // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 124–129.

28. Хольшев Н. В., Коновалов Д. Н., Прохоров А. В., Минаев П. С. Лабораторный стенд для диагностирования шин автомобилей. *Вестник СибАДИ*. 2021;18(6):734-745. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

REFERENCES

1. Hol'shev N. V., Konovalov D. N., Lavrenchenko A. A. Utochnennaya metodika rascheta kursovyyh uglov avtomobilya v konce tormozheniya [Refined method for calculating vehicle heading angles at the end of braking]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2021; 2: 86 - 95 (In Russ.)

2. Balakina E. V., Sergienko I. V. Metodika vybora razmerov kolyos na raznyh osyah avtomobilya s ABS po kriteriyu uluchsheniya traektornoj ustojchivosti pri tormozhenii [A method for selecting wheel sizes on different axles of a car with ABS according to the criterion for improving trajectory stability during braking]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2022;1: 12-15 (In Russ.)

3. Litvinov A. S. *Upravlyaemost' i ustojchivost' avtomobilya* [Handling and stability of the car]. Moscow: Engineering, 1971: 416 p. (In Russ.)

4. Revin A. A., Komarov D. YU. Neravnomernost' dejstviya tormoznyh mekhanizmov i ee vliyanie na rabochij process tormoznoj sistemy avtomobilya s ABS [Uneven action of brake mechanisms and its influence on the working process of the brake system of a car with ABS]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2009; 12: 19-20. (In Russ.)

5. Bykov V. V. Eksperimental'nye issledovaniya ustojchivosti avtomobilya kategorii M1 pri neravnomernom dejstvii tormoznyh sil [Experimental studies of the stability of a car of category M1 with uneven action of braking forces]. *Vesti avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 2019; 4 (31): 11-20. (In Russ.)

6. Podrigalo M. A., Holodov M. P. Vliyanie raspredeleniya tormoznyh sil mezhdru osyami na ustojchivost' kolesnyh mashin pri zanosе [Influence of the distribution of braking forces between the axles on the stability of wheeled vehicles during skidding]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2011; 29: 11–17. (In Russ.)

7. Podrigalo M. A., Volkov V. L., Dobrogorskij M. V. Ocenka ustojchivosti avtomobilya pri operezhayushchem blokirovanii zadnih kolyos v processe tormozheniya [Evaluation of vehicle stability with advanced blocking of the rear wheels during braking]. *Avtomobile i traktorostroenie. Vestnik NTU «HPI»*. 2004; 2: 101–109. (In Russ.)

8. Podrigalo M. A., Karpenko V. A. Neravnomernost' vertikal'nyh reakcij na kolyosah avtomobilya i ego ustojchivost' pri tormozhenii [Uneven vertical reactions on the wheels of the car and its stability during brak-

ing]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2001; 2: 19–21 (In Russ.)

9. Podrigalo M. A., Turenko A. I. Ocenka ustojchivosti avtomobilya pri dejstvii vozmushchenij v processe sluzhebnyh tormozhenij [Assessment of vehicle stability under the action of disturbances in the process of service braking]. *Vestnik HNADU*. 2015; 69: 40–44 (In Russ.)

10. Schick B., Bunz D. Fahrzeug-Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten. *Automobiltechnische Zeitschrift*. 2004; Vol. 106. Iss. 11: 988-994.

11. Pacejka H. B., Tyre and Vehicle Dynamics. Burlington: Butterworth-Heinemann. 2006: 657.

12. Andrew Day. Braking of Road Vehicles. Butterworth-Heinemann. 2014: 488. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07386-6>.

13. Revin A. A. *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobilej i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya* [Theory of operational properties of automobiles and road trains with ABS in braking mode]. Volgograd: VolGTU, 2002: 372. (In Russ.)

14. Balakina E. V., Zotov N. M., Fedin A. P. Oso-bennosti komp'yuternogo modelirovaniya v real'nom vremeni processa tormozheniya avtomobil'nogo kole-sa [Features of computer simulation in real time of the braking process of an automobile wheel]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2015; 16 (3) :174-182. <https://doi.org/10.17587/mau.16.174-182> (In Russ.)

15. Fedotov A. I. Vliyaniye raboty ABS na tormoznyuyu effektivnost' i ustojchivost' avtomobilya [Influence of ABS operation on braking efficiency and vehicle stability]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; 8(79): 130-133. (In Russ.)

16. Ivanov A. M., Kristal'nyj S. R., Popov N. V. *Sistemy avtomaticheskogo ekstrennogo tormozheniya* [Systems of automatic emergency braking]. Moscow: MADI, 2018: 180. (In Russ.)

17. Turenko A. N., Klimenko V. I., Bogomolov V. A. *Realizatsiya intellektual'nykh funktsij v elektronno-pnevmaticheskom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv* [Implementation of intellectual functions in the electronic-pneumatic brake control of vehicles] Har'kov: HNADU. 2015. 450. (In Russ.)

18. Khorasani-Zavareh D., Shoar S., Saadat S. Antilock braking system effectiveness in prevention of road traffic crashes in Iran. *BMC public health*. May 2013. Vol. 13(1): 1-6.: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-439>.

19. Soni A., Jitendra Dr. Anti-Lock Braking System// *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*. February 2022. Vol. 9, Iss. 1: 248-252: <https://doi.org/10.55524/ijrem.2022.9.1.48>.

20. Beles H., Rus A., Dragomir G., Mitran T., Trusca D., Tolea B. Researches Regarding the Continuous Improvement of the ABS (Anti-Lock Braking System) Operation for the Passenger Cars. *26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. January 2016.: 196-205.: <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.027>.

21. Zhilejkin M. M., Chugunov D. S. Algoritm raboty antiblokirovochnoj sistemy dlya dvuhosnykh avtomobilej s odnoj vedushchej os'yu s adaptivnym pereraspre-

deleniem tormoznykh usilij [Algorithm of operation of the anti-lock braking system for two-axle vehicles with one driving axle with adaptive redistribution of braking forces]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2021. Vol. 15, № 2: 93 - 100: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-93-100> (In Russ.)

22. Gorshkov YU. G., Kalugin A. A., Starunova I. N., Zhitejko I. S. Antiblokirovochnaya tormoznaya sistema kolesnykh mashin s pnevmaticheskimi tormoznymi ustroystvami [Anti-lock braking system of wheeled vehicles with pneumatic brakes]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014; 4 (114): 133-138 (In Russ.)

23. Ashraf Sh., Sharkawy Abdel-Nasser, Moaaz Ah., Ghazaly N. A. Comparative Study of Different Control Methods for Anti-Lock Braking System (ABS). *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*. June 2021. Vol.2 (1): 27-34.: <https://doi.org/10.21608/svusrc.2021.65855.1007> (in English)

24. Revin A. A., Poluektov M. V., Radchenko M. G. ABS i resursy elementov tormoznoj sistemy [ABS and the resource of the elements of the brake system]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2009; 10: 39-40. (In Russ.)

25. Podrigalo M. A., Tarasov YU. V. Metodika racional'nogo vybora friktsionnykh par perednykh i zadnykh tormozov avtomobilej po temperaturnym harakteristikam [The method of rational choice of friction pairs of front and rear brakes of cars according to temperature characteristics] *Avtomobil'nyj transport*. 2004; 15: 13–17 (In Russ.)

26. Revin A. A., Komarov D. YU., Dedov S. S. Vliyaniye na rabochij process tormoznoj sistemy legkovogo avtomobilya s ABS yavleniya snizheniya koeffitsienta treniya pary "tormoznaya kolodka - tormoznoj disk" [Influence on the working process of the brake system of a passenger car with ABS of the phenomenon of reducing the coefficient of friction of the pair "brake pad - brake disc"] *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2008; 4: 49-51. (In Russ.)

27. Korneeva N. K., Pichugova L. N., Glushkova E. V. Opredeleniye koeffitsienta treniya skol'zheniya metodom garmonicheskikh kolebanij. [Determination of the coefficient of sliding friction by the method of harmonic oscillations] *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2021; T. 7. № 2: 124-129. (In Russ.)

28. Holshev N. V., Kononov D. N., Prokhorov A. V., Minaev P. S. Laboratory stand for car tire diagnostics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18 (6):734-745. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Хольщев Н. В. Разработка методики экспериментальных исследований и проведение экспериментальных исследований.

Конев А. Ю. Изготовление лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований.

Ведищев С. М. Обработка экспериментальных данных.

Прохоров А. В. Обработка экспериментальных данных.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Nikolai V. Holshev Development of experimental research methods and experimental research.

Andrei Y. Konev Laboratory production and pilot studies.

Sergei M. Vedishchev Processing experimental data.

Alexei V. Prokhorov Processing experimental data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хольшев Николай Васильевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта», SPIN-код: 9972-8543.

Конев Андрей Юрьевич – аспирант кафедры «Агроинженерия».

Ведищев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Агроинженерия», SPIN-код: 3019-6079.

Прохоров Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Агроинженерия», SPIN-код: 7624-6841.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai V. Holshev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering and Motor Transport Department Technology, SPIN-код: 9972-8543.

Andrei Y. Konev – Graduate student of the Agroengineering Department.

Sergei M. Vedishchev – Dr. of Sci., Professor, Head department of the Agroengineering Department, SPIN-код: 3019-6079.

Alexei V. Prokhorov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Agroengineering Department, SPIN-код: 7624-6841.

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья

УДК 691.555

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

EDN: QFWFGG



СМЕШЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, О. М. Шеметова, Л. Х. Загороднюк, А. Л. Бочарников*

Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова

г. Белгород, Россия

saad.shadeed.ss71@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6827-6976>

olga95kizilova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-499X>

lhz47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9840-4414>

engineersmik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7477-803X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Смешение сухих компонентов в смесительных аппаратах является одним из важнейших этапов любого технологического процесса при изготовлении композиционного материала. К настоящему времени в различных технологиях используется самое разнообразное смесительное оборудование, которое характеризуется различными принципами смешения и конструктивными решениями. Особый интерес для приготовления качественных и однородных смесей теплоизоляционного назначения представляет пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой. В статье приведены результаты исследований с использованием метода математического планирования полнофакторного эксперимента ПФЭЦКРП², позволяющего наиболее адекватно оценить происходящие процессы при минимизации систематических ошибок.

Материалы и методы. В работе в качестве сырьевых материалов для проведения испытаний использовали портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 с удельной поверхностью 308 м²/кг, песок Вольского месторождения. В качестве легкого наполнителя использовали вспученный вермикулит, полученный в результате термообработки природного вермикулита при температуре около 700 °С.

Результаты. Теплоизоляционные смеси, приготовленные в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, обеспечивают получение теплоизоляционных растворов со стабильными показателями по плотности 1420 кг/м³, имеющие достаточные прочностные показатели при сжатии 3,3 МПа, гарантируют высокие теплозащитные свойства в строительных конструкциях.

Заключение. Разработанная конструкция и проведенные исследования позволили установить высокую эффективность предлагаемого смесителя, обеспечивающего равномерное распределение смешиваемых частиц, высокую гомогенизацию и создание условий для ускорения физико-химических взаимодействий в создаваемой смеси при последующем затворении приготовленной смеси водой и формирование требуемой внутренней структуры создаваемых композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смешение, вяжущая композиция, вермикулит, портландцемент, пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 26.12.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, Шеметова О. М., Загороднюк Л. Х., Бочарников А. Л. Смешение теплоизоляционных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 126-137. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

© Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, Шеметова О. М., Загороднюк Л. Х., Бочарников А. Л., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

EDN: QFWFGG

MIXING OF HEAT-INSULATING MIXTURES IN PNEUMATIC MIXER WITH SPIRAL ENERGY CARRYING TUBE

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Olga M. Shemetova,
Lilia Kh. Zagorodnuk, Andrey L. Bocharnikov*

V. G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

saad.shadeed.ss71@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6827-6976>

olga95kizilova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-499X>

lh47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9840-4414>

engineersmik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7477-803X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Mixing of dry components in mixers is one of the most important stages of any technological process in the manufacture of a composite material. To date, various technologies use a wide variety of mixing equipment, which is characterized by different principles of mixing and design solutions. Of particular interest for the preparation of high-quality and homogeneous mixtures for heat-insulating purposes is a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube. The article presents the results of studies using the method of mathematical planning of the full-factor $\Pi\Phi\Xi\zeta\text{KPP}2^4$ experiment, which makes it possible to most adequately assess the ongoing processes while minimizing systematic errors.

Materials and methods. In the work, ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 Portland cement with a specific surface area of $308 \text{ m}^2 / \text{kg}$, sand of the Volsky deposit were used as raw materials for testing. Expanded vermiculite obtained as a result of heat treatment of natural vermiculite at a temperature of about 700°C was used as a light filler.

Results. Heat-insulating mixtures prepared in a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube ensure the production of heat-insulating mortars with stable density values of 1420 kg/m^3 , having sufficient compressive strength of 3.3 MPa, and guarantee high heat-shielding properties in building structures.

Conclusion. The developed design and the conducted studies made it possible to establish the high efficiency of the proposed mixer, which provides a uniform distribution of the particles to be mixed, high homogenization and the creation of conditions for accelerating the physicochemical interactions in the created mixture with subsequent mixing of the prepared mixture with water and the formation of the required internal structure of the created composites.

KEYWORDS: mixing, binder composition, vermiculite, Portland cement, pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube

ACKNOWLEDGEMENTS: the study was supported by the RSF grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 from 03/24/2022.

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 20.02.2023.

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. Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Shemetova Olga M., Zagorodnuk Lilia Kh., Bocharnikov Andrey L. Mixing of heat-insulating mixtures in pneumatic mixer with spiral energy carrying tube. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 126-137. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

© Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Shemetova O. M., Zagorodnuk L. Kh., Bocharnikov A. L., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Получение высококачественных сухих теплоизоляционных смесей представляет важную задачу для современных строительных технологий^{1, 2, 3} [1, 2, 3, 4, 5]. От качества приготовления сухих смесей зависят технологические, физико-механические и эксплуатационные характеристики приготавливаемого продукта^{4, 5} [6, 7, 8]. В настоящее время ученые ищут новые пути создания строительных композитов с регулируемыми свойствами, способными выдерживать физико-механические, теплотехнические и эксплуатационные нагрузки^{6, 7} [9, 10, 11, 12]. Смешение сухих компонентов в ограниченном объеме смесителя является одним из существенных элементов технологического процесса, создающего условия для равномерного распределения смешиваемых частиц, дополнительное диспергирование, гомогенизацию, в нередких условиях досушку сырьевых ингредиентов и создание потенциальных условий для ускорения физико-химических взаимодействий в смешиваемой системе при последующем затворении приготовленной смеси водой и формирование дальнейших фазовых контактов при образовании внутренней структуры композитов^{8, 9}.

К настоящему времени имеется значительное количество самых разнообразных смесителей для перемешивания различных сыпучих материалов. В технологических процессах стоимость смесителей может составлять до 40% стоимости всего оборудования.

Несмотря на положительные факторы, существующие смесители имеют определенные

недостатки. В связи с тем, что используемые сырьевые материалы и составы приготавливаемых смесей, имеющих самый широкий спектр назначения, постоянно совершенствуются и в соответствии с поставленными задачами требования к смесителям также повышаются и требуют разработки новых конструкций и технологических решений.

Смешение сухих компонентов при приготовлении различных материалов является одной из важнейших технологических операций, определяющих физико-механические и технико-экономические показатели, создаваемого композита. Эффективное развитие строительной отрасли требует создания нового эффективного оборудования, обеспечивающего высокие технико-экономические, технологические и физико-механические показатели создаваемым материалом.

Особое место среди смесителей занимают пневматические смесители. В связи с вышеизложенным особый интерес представляет пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой, отвечающий требованиям современных стандартов и безопасности труда в строительстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе в качестве сырьевых материалов для проведения испытаний использовали портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 с удельной поверхностью 308 м²/кг, песок Вольского месторождения (таблица 1).

¹ Фадин Ю. М., Шеметова О. М., Шеметов Е. Г., Загороднюк Л. Х., Аль Мамури Саад Кхалил Шадид. Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов. Патент RU 214199 U1 14.10.2022. 7 с.

² Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А., Захаренко В. В., Зиновкина Т. В., Таран А. Л., Костянян А. Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. М.: Логос, 2002. 912 с.

³ Альтамуро В. Оборудование предприятий строительных производств. Нью-Йорк: The City University of New-York, 2003. 738 с.

⁴ Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 томах, Том 2. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

⁵ Анциферов С. И., Пахотин Е. Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // Сборник. Образование, наука, производство БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. С. 1402–1405.

⁶ Кальянов Н. Н., Мерзляк А. Н. Вермикулит и перлит – пористые заполнители для теплоизоляционных изделий // Москва: Госстройиздат. 1961. 155 с.

⁷ Zhang H. Building Materials in Civil Engineering // Woodhead Publishing. UK. 2011. Vol. 1. Pp 440.

⁸ Дергунов С. А., Рубцова В. Н. Модификация сухих строительных смесей // материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Современные технологии сухих смесей в строительстве MixBUILD». М.: АЛИТ, 2004. С. 30–35.

⁹ Орехова Т. Н., Уваров В. А. Анализ конструкций пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Интерстроймех – 2010: Сб. докладов Международной научно-практической конференции. Белгород. Изд-во БГТУ, 2010. С. 92–94.

Таблица 1

Характеристики кварцевого песка Вольского месторождения

Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of quartz sand from the Volskoye deposit

Source: compiled by the authors.

Показатель						Значение			
Насыпная плотность						1468 кг/м³			
Содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц						0,72 мас. %			
Потеря массы при прокаливании						не более 0,5%			
Содержание глинистых частиц						не более 1%			
Модуль крупности									
2,5									
Химический состав									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZrO ₂
96,2	2,84	0,139	0,024	0,144	0,07	0,287	0,054	0,023	0,013

Таблица 2

Химический состав вспученного вермикулита (% по массе)

Источник: составлено авторами.

Table 2

The chemical composition of expanded vermiculite (% by mass)

Source: compiled by the authors.

Химический состав, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Прочее, %
43,3	15,3	13,4	2,2	17,4	1,3	0,4	2,6	4,1

В качестве легкого наполнителя использовали вспученный вермикулит, полученный в результате термообработки природного вермикулита при температуре около 700°C. Химический состав приведен в таблице 2.

Вермикулит имеет переслаивающиеся фазы, такие как вермикулит, флогопит и гидробиотит. Гранулы вспученного вермикулита представлены тончайшими слюдистыми пластинками, при нагревании они значительно увеличиваются в объеме, что является предпосылками для эффективного использования вермикулита в качестве наполнителя и заполнителя теплоизоляционных растворов и бетонов [4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

До недавнего времени смешение считалось механическим процессом, в последние

годы исследователи установили закономерности в процессе перераспределения частиц при гидродинамическом воздействии. При получении сухих смесей отмечается образование вторичных агрегаций отдельных зерен смешиваемого порошка вследствие различий химических, физических и гранулометрических особенностей компонентов, их насыпной плотности, строением частиц, сцеплением между отдельными частицами, текучестью порошка, его абразивностью, наличием электростатического заряда и так далее.

Особое место среди существующих смесителей занимает пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой.

С целью приготовления сухих теплоизоляционных смесей была разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования процессов смешения сыпучих материалов (рисунок 1).

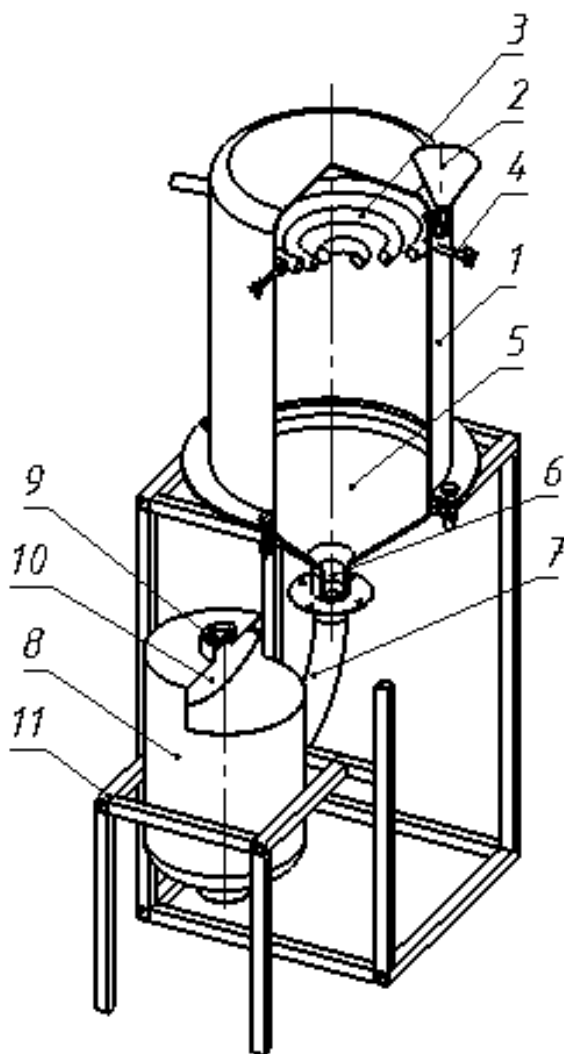


Рисунок 1 – Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой: 1 – камера; 2 – загрузочный патрубок; 3 – спиральная энергонесущая трубка; 4 – держатели; 5 – коническое днище; 6 – выгрузочный патрубок; 7 – труба; 8 – бункер; 9 – вентилятор; 10 – фильтр; 11 – рама
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube: 1–chamber; 2 – loading pipe; 3 – spiral energy-carrying tube; 4 – holders; 5 – conical bottom; 6 – unloading pipe; 7 – pipe; 8 – bunker; 9 – fan; 10 – filter; 11–frame
Source: compiled by the authors.

Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой характеризуется высокоэкологическими и производственными показателями. Учитывая разные показатели по плотности смешиваемых сырьевых компонентов, различные характеристики пористости и шероховатости исследуемых ингредиентов смесей, использование этого пневмосмесите-

ля предполагает получение смесей с высокими показателями по качеству и однородности. Смешиваемые материалы, поступающие в корпус смесителя в хаотично вихревом потоке, обеспечивают равномерное смешение всех компонентов смесей, включая и мелкодисперсные частицы. Вследствие особенностей строения вермикулита предполагается, что этот смеситель будет препятствовать оседанию цементных зерен в порах материала, а также равномерно распределяться по всей поверхности заполнителя, кроме того, высокие скорости энергоносителя будут способствовать лучшему смешению компонентов смеси [1].

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и изготовлена лабораторная установка, в которой изучались процессы смешения различных сырьевых композиций, в том числе разработанная сухая строительная смесь для теплоизоляционных растворов.

Схема лабораторной установки и фото пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой приведена на рисунке 1 и 2.



Рисунок 2 – Лабораторная установка пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Laboratory setup of a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube
Source: compiled by the authors.

Принцип работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой заключается в использовании энергоносителя, представленного сжатым воздухом, поступающим из компрессора 4ВУ1-5/9М, оснащенного электродвигателем, ресивером и реле давления [13, 14, 15]. Воздух, поступающий с ресивера, подается в рабочую камеру пневматического смесителя. Производительность компрессора 0,56 м³/мин, давление в камере 0,8 МПа. В установке принят электродвигатель мощностью 22 кВт. Через шнековый дозатор сухие компоненты для смешения поступают в корпус 1 пневмосмесителя, через патрубок загрузки 2. В рабочей зоне материал посредством сжатого воздуха подхватывается и одновременно с сырьём, поступающим из отверстия спиральной трубки 3, перемещается в корпус смесителя. Вследствие спиральной формы энергонесущей трубки создается большая поверхность взаимодействия сжатого воздуха с сырьевыми компонентами, что сказывается на повышении качества перемешивания конечного продукта из-за улучшения процесса смешения. В днище 5, имеющего коническую форму, создается дополнительное разрежение и по завершению процесса смешения полученная смесь разгружается посредством патрубка 6, предназначенного для выгрузки. Затем смесь перемещается через трубу 7, накапливается в бункере 8. Сжатый воздух через вентилятор 9, очищаясь, поступает в фильтр 10. Перемешанный материал через выходной патрубок упаковывается и складывается. Пневмосмеситель с бункером установлен на раме 11.

При смешении в рабочей камере пневмосмесителя происходит равномерное распределение частиц сырьевых компонентов, которые перед смешением могут находиться в различном состоянии. Цель процесса смешения заключается в получении гомогенной смеси, когда в любой точке смесителя частицы всех компонентов равномерно распределяются в общей массе смесителя в зависимости от принятого соотношения сырьевых компонентов.

При проведении экспериментов исследуемая смесь подвергалась перемешиванию при различных режимах работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Для определения однородности готовой смеси после смешения в пневмосмесителе были проведены эксперименты с широко варьируемыми параметрами: коэффициент загрузки – ψ , %; шаг спирали – H , мм; количество отверстий на спирали – n , шт; давление в камере смешения – P , МПа [16, 17, 18, 19].

В работе использовался метод математического планирования эксперимента, который позволил при проведении минимального количества опытов получить максимальную информацию по выходным параметрам, прочности и плотности [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Идеализация динамической модели пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой позволяет на основе математического планирования и моделирования решить задачу оптимизации эксперимента. Для этой цели используется композиционный план полного факторного эксперимента, который позволяет получить нелинейные математические модели установки пневматического смешения [26].

Для выполнения лабораторных экспериментов принимаем план полного факторного эксперимента ПФЭЦКРП2⁴. Данный тип полного факторного эксперимента позволяет наиболее адекватно применять для исследования происходящих процессов при минимизации систематических ошибок. Математическое описание плана данного эксперимента записывается в виде уравнения регрессии^{2,3}:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \cdot x_j + \sum_{u,j=1}^k a_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^k a_{jj} \cdot x_j^2, \quad (1)$$

где, y – функция отклика;

a_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии;

a_j – коэффициенты при линейной зависимости;

a_{uj} – коэффициенты при парном взаимодействии факторов;

a_{jj} – коэффициенты при квадратичном взаимодействии факторов;

x_u, x_j – исследуемые независимые переменные;

$j = 1, 2, \dots, k$; a_{jj} – квадратичные эффекты.

Значимость коэффициентов проверяется по критерию Стьюдента [4]:

$$t = \frac{|a_j|}{s_{\{b_j\}}}, \quad (2)$$

где a_j – коэффициент при факторах варьирования в уравнении регрессии;

$s_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Для проверки адекватности математической модели используется критерий Фишера [5]. Во время проведения экспериментов требуется определенное количество измерений и есть вероятность возникновения как случайной погрешности, так и погрешности на контрольно-измерительных приборах.

Суммарную погрешность можно определить как⁴:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\text{приб}})^2}, \quad (3)$$

где $\Delta x_{\text{случ}}$ – случайная погрешность измерений;
 $\sigma_{\text{приб}}$ – приборная погрешность.

В качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов при смешении сухих строительных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой принимается:

$P (x_1)$ – давление сжатого воздуха, 50–250 кПа;

$n (x_2)$ – количество отверстий на спирали, 15–55 шт;

$\psi (x_3)$ – коэффициент загрузки материала, 50–90%;

$H (x_4)$ – шаг спирали, 10–50 мм.

В качестве функций отклика на воздействие факторов, определяющих характер протекания процесса, выбраны: часовая производительность Q (кг/ч), однородность распределения компонентов V_c , %, предел прочности на сжатие образцов $\delta_{\text{сж}}$ (МПа), плотность ρ (кг/м³).

В соответствии с планом принято пять уровней факторов: 1 – нижний; 0 – средний; +1 – верхний; -2 и +2 – звёздные точки. Указанные уровни варьирования сопоставляются с реальными условиями результатов пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой при смешении полидисперсных смесей.

Исследуемые факторы и уровни их варьирования приведены в таблице 3.

В соответствии с матрицей планирования для ПФЭЦКРП²⁴ проводились экспери-

ментальные исследования. При проведении экспериментов физико-химический состав материалов оставался неизменным. Изучался процесс смешения сырьевых компонентов портландцемента и вермикулита при различных соотношениях: цемент (90...70%), вермикулит (10...30%), кварцевый песок (10...30%).

Предварительно подготовленные сухие теплоизоляционные смеси: цемент, вермикулит засыпали в загрузочный люк смесителя, после чего ингредиенты попадали в смесительную камеру, где под действием сжатого воздуха происходило смешение компонентов. Готовые перемешанные смеси засыпали в сухие бумажные пакеты и герметично упаковывали.

Из приготовленных теплоизоляционных смесей формовали образцы – кубики размером 30 x 30 x 30 мм по четыре-пять образцов каждого состава. Образцы хранили в воздушно-сухом состоянии в течение 28 сут при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 50%.

Определение плотности образцов, кг/м³ проводили в сухом состоянии и вычисляли показатель как среднее значение испытаний всех образцов. Определение прочности затвердевших образцов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 58767–2019.

При определении качества смешения в пневмосмесителе применялся метод точечного отбора проб, который позволяет установить наличие застойных зон в данном смесителе.

В работе использовался метод контроля распределения сырьевых компонентов в смеси, предложенный А. М. Ластовцевым для определения коэффициента неоднородности по одному ключевому компоненту²

Таблица 3
 Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭЦКРП²⁴
 Источник: составлено авторами.

Table 3
 Studied factors and ПФЭЦКРП²⁴ levels of variation
 Source: compiled by the authors.

Исследуемые факторы	Обозначение	Уровни варьирования					
		-2	-1	0	1	+2	Интервал
Давление в пневматическом смесителе, кПа	X_1	50	100	150	200	250	50
Количество отверстий на спирали, шт.	X_2	15	25	35	45	55	10
Коэффициент загрузки материала, %	X_3	50	60	70	80	90	10
Шаг спирали, мм	X_4	10	20	30	40	50	10

$$V_c = \frac{100}{C_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация по массе компонента при идеальном его распределении; C_i – значения концентрации ключевого компонента по массе одного из компонентов в пробах; n – число проанализированных взятых проб.

В результате проведения лабораторных исследований по смешению сырьевых компонентов в пневматическом смесителе со спираль-

ной энергонесущей трубкой были получены результаты, представленные в таблице 4. Изменяя варьируемые факторы, можно оценить исследуемые параметры: производительность пневматического смесителя – Q , кг/ч, коэффициент неоднородности смеси – V_c , %, предел прочности при сжатии – $\delta_{сж}$, МПа; плотность растворов – ρ , кг/м³. Исследования проводили с полиминеральной смесью, включающей портландцемент, вспученный вермикулит и кварцевый песок.

Таблица 4
Полученные результаты экспериментальных исследований
Источник: составлено авторами.

Table 4
The results of experimental studies
Source: compiled by the authors.

№ опыта	Варьирование фактора				Исследуемые параметры			
	Р, кПа	п, шт	ψ, %	Н, мм	Q, кг/ч	Vc, %	МПа	kg/m ³
1	100	25	60	20	13,4	8	3,7	1570
2	200	25	60	20	13,35	9	3,1	1419
3	100	45	60	20	13,7	6	3,5	1510
4	200	45	60	20	13,9	5	3,1	1320
5	100	25	80	20	13	13	3,4	1515
6	200	25	80	20	13,02	11	3,3	1501
7	100	45	80	20	14,65	2	3,6	1540
8	200	45	80	20	13,5	8	3,8	1550
9	100	25	60	40	12,8	12	3,5	1210
10	200	25	60	40	12,2	16	3	1290
11	100	45	60	40	13,25	9	3,2	1457
12	200	45	60	40	13,5	8	3,3	1405
13	100	25	80	40	10,3	37	3,6	1635
14	200	25	80	40	12,7	27	3,4	1545
15	100	45	80	40	15,2	9	3,5	1579
16	200	45	80	40	15,4	7	4	1650
17	50	35	70	30	15,1	9	3,9	1565
18	250	35	70	30	14,8	10	4	1573
19	150	15	70	30	16,6	2	4,1	1509
20	150	55	70	30	15,3	8	3,8	1501
21	150	35	50	30	15,8	4	3,3	1450
22	150	35	90	30	14,1	3	3,7	1570
23	150	35	70	10	14	4	4	1510
24	150	35	70	50	14,6	2	3,3	1420
25	150	35	70	30	13,8	5	3	1290
26	150	35	70	30	13,7	6	2,8	1205
27	150	35	70	30	13,7	6	2,7	1198
28	150	35	70	30	13,3	6	3	1203
29	150	35	70	30	13,6	7	3,1	1150
30	150	35	70	30	13,7	6	3,15	1223
31	150	35	70	30	14,1	3	3,1	1310

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями по изучению оптимальных режимов смешения сухой теплоизоляционной смеси, проведенными в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, установлено, что наилучшим режимом является режим при давлении сжатого воздуха $P = 150$ кПа; количестве отверстий на спирали $n = 35$; при коэффициенте загрузки материала $\psi = 70\%$; с шагом спирали $H = 50$ мм. При таких условиях работы пневматического смесителя часовая производительность составила $Q = 14,6$ (кг/ч); с однородностью распределения компонентов $V_c = 2\%$. Образцы растворов, отформованные из приготовленных смесей, характеризуются пределом прочности при сжатии образцов $\delta_{сж} = 3,3$ МПа; с плотностью $\rho = 1420$ кг/м³.

Теплоизоляционные смеси, приготовленные в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, обеспечивают получение теплоизоляционных растворов со стабильными показателями по плотности 1420 кг/м³, имеющие достаточно прочностные показатели при сжатии 3,3 МПа, гарантируют высокие теплозащитные свойства в строительных конструкциях.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют об эффективном смешении сырьевых компонентов и позволяют рекомендовать разработанный пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой для приготовления теплоизоляционных растворов с использованием легких заполнителей.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение № 3 от 24.03.2022.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ясинская Е. В., Никулин Н. М., Кривцов Е. Е. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 29–32.
2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260. Pp. 120440. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.
3. Schackow A., Effting C., Folgueras M. V., Guths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent // Construction Building Materials. 2014. Vol. 57. Pp. 190–197.
4. Шкарин А. В., Загороднюк Л. Х., Щекина А. Ю., Лугинина И. Г. Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2012. № 9. С. 89–92.
5. Шкарин А. В., Перепечин С. А., Завгородний А. А., Парасоцкая О. М., Соломина И. В. Смешение сухих строительных смесей в роторно-рециркуляционном смесителе // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 68–70.
6. Sengul O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M.A. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete // Energy Buildings. 2011. Vol. 43. Iss. 2. Pp. 671–676.
7. Degirmenci N., Arin N. Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. 2011. Vol. 18. Pp. 61–68.
8. Unal O., Uygunoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation // Building and Environment. 2007. Vol. 42. Pp. 584–590.
9. Koksall F., Gencel O., Brostow W., Hagg Lobland H. E. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite // Materials Research Innovations. 2012. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 7–13.
10. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability // Construction Building Materials. 2008. Vol. 22. Iss. 8. Pp. 1798–1806.
11. Сумской Д. А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2 (76). С. 283–289. DOI 10.20914/2310-1202-2018-2-283-289.
12. Загороднюк Л. Х., Рахимбаев Ш. М., Сумской Д. А., Рыжих В. Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 11. С. 75–88. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88.
13. Abu-Jdayil B., Mourad A.-H., Hittini W., Hassan M., Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview // Construction Building Materials. 2019. Vol. 214. Pp. 709–735.
14. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A. P., Gladkova N.A., Timokhin R.A., et al., Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash // Magazine Civil Engineering. 2018. Vol. 79. Iss. 3. Pp. 66–76.
15. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems //

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 103. Pp. 71–84.

16. Ramezani pour A. A., Mahmoud Motahari Karein S., Vosoughi P., Pilvar A., Isapour S., Moodi F. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete // *Construction Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 222–228.

17. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // *Construction Building Materials*. 2018. Vol. 179. Pp. 302–306.

18. Koksai F., Mutluay E., Gencel O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene // *Construction Building Materials*. 2020. Vol. 236. Pp. 117789.

19. Khoukhi M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: impact on building energy performance // *Energy Build*. 2018. Vol. 169. Pp. 228–235.

20. Perre P., Challanonnex A., Colin J. On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 133. Pp. 968–975.

21. Rosti B., Omidvar A., Monghasemi N., Optimum position and distribution of insulation layers for exterior walls of a building conditioned by earth-air heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. Pp. 114362.

22. Abirami T., Loganaganandan M., Murali G., Fediuk R., Vickram Sreekrishna R., Vignesh T., Janupriya G., Karthikeyan K. Experimental research on impact response of novel steel fibrous concretes under falling mass impact // *Construction Building Materials*. 2019. Vol. 222. Pp. 447–457.

23. Hunter N.J.R., Weinberg R.F., Wilson C. J. L., Luzin V., Misra S. Quartz deformation across interlayered monomineralic and polymineralic rocks: a comparative analysis // *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 119. Pp. 118–134.

24. Pachta V., Papadopoulos F., Stefanidou M. Development and testing of grouts based on perlite by-products and lime // *Construction Building Materials*. 2019. Vol. 207. Pp. 338–344.

25. Kapeluszna E., Kotwica L., Pichor W., Nocun-Wczelik, Cement-based composites with waste expanded perlite - structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments // *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Pp. e00160.

26. Zagorodnyuk L. Kh., Sumskey D. A., Lesovik V. S., Fediuk R. S. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120440>.

REFERENCES

1. Yasinskaya E. V., Nikulin N. M., Krivtsov E. E. Study of the characteristics of nanomodified dry building mixtures [Issledovanie harakteristik nanomodifirovannyh suhih stroitel'nyh smesey]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2011; 2 (20): 29–32. (In Russ.)

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020; 260: 120440. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.

3. Schackow A., Effting C., Folgueras M. V., Guths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction Building Materials*. 2014; 57:190–197.

4. Shkarin A. V., Zagorodnyuk L. Kh., Shchekina A. Yu., Luginina I. G. Obtaining composite binders in various grinding units [Poluchenie kompozitsionnyh vyazhushchih v razlichnyh pomolnyh agregatah]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2012; 9: 89–92. (In Russ.)

5. Shkarin A.V., Perepechin S.A., Zavgorodniy A. A. Parasotskaya O. M., Solomina I.V. Mixing of dry building mixes in a rotary recirculation mixer [Smeshenie suhih stroitel'nyh smesey v rotornorecirkulyacionnom smesitele]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012; 6: 68–70. (In Russ.)

6. Sengul O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M.A. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy Buildings*. 2011; 43. Iss. 2: 671–676.

7. Degirmenci N., Arin N.Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2011; 18: 61–68.

8. Unal O., Uygungoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 2007; Vol. 42: 584–590.

9. Koksai F., Gencel O., Brostow W., Hagg Lobland H. E. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*. 2012; Vol. 16. Iss. 1: 7–13.

10. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction Building Materials*. 2008; Vol. 22. Iss. 8: 1798–1806.

11. Sumskey D. A. Heat-insulating mortar based on composite binder [Teploizolyatsionnyj rastvor na osnove kompozitsionnogo vyazhushchego]. *Vestnik VGUIT*. 2018; V. 80. No. 2 (76): 283–289. DOI 10.20914/2310-1202-2018-2-283-289. (In Russ.)

12. Zagorodnyuk L. Kh., Rakhimbaev Sh. M., Sumskey D. A., Ryzhykh V. D. Features of the processes of hydration of binder compositions using waste expanded perlite sand. *Vestnik BG TU im. V.G. Shuhova*. 2020; 11: 75-88. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88. (In Russ.)
13. Abu-Jdayil B., Mourad A.-H., Hittini W., Hassan M., Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview. *Construction Building Materials*. 2019; Vol. 214: 709–735.
14. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Gladkova N.A., Timokhin R.A., et al., Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash. *Magazine Civil Engineering*. 2018; Vol. 79. Iss. 3: 66–76.
15. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; Vol. 103: 71–84.
16. Ramezani pour A. A., Mahmoud Motahari Karein S., Vosoughi P., Pilvar A., Isapour S., Moodi F. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete. *Construction Building Materials*. 2014; Vol. 66: 222–228.
17. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction Building Materials*. 2018; Vol. 179: 302–306.
18. Koksai F., Mutluay E., Gencel O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction Building Materials*. 2020; 236: 117789.
19. Khoukhi M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: impact on building energy performance. *Energy Build*. 2018; Vol. 169: 228–235.
20. Perre P., Challanonnex A., Colin J. On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 133: 968–975.
21. Rosti B., Omidvar A., Monghasemi N., Optimum position and distribution of insulation layers for exterior walls of a building conditioned by earth-air heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2019; Vol. 163: 114362.
22. Abirami T., Loganaganandan M., Murali G., Fediuk R., Vickram Sreekrishna R., Vignesh T., Janupriya G., Karthikeyan K. Experimental research on impact response of novel steel fibrous concretes under falling mass impact. *Construction Building Materials*. 2019; 222: 447–457.
23. Hunter N.J.R., Weinberg R.F., Wilson C.J.L., Luzin V., Misra S. Quartz deformation across interlayered monomineralic and polymineralic rocks: a comparative analysis. *Journal of Structural Geology*. 2019; 119: 118–134.
24. Pachta V., Papadopoulos F., Stefanidou M. Development and testing of grouts based on perlite by-products and lime. *Construction Building Materials*. 2019; 207: 338–344.
25. Kapeluszna E., Kotwica L., Pichor W., Nocun-Wczelik, Cement-based composites with waste expanded perlite - structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments. *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Pp. e00160.
26. Zagorodnyuk L. Kh., Sumskey D. A., Lesovik V. S., Fediuk R. S., Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120440>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид. Подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Проведение эксперимента. Аprobация полученных результатов, написание статьи.

Шеметова О. Л. Подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Проведение эксперимента. Аprobация полученных результатов.

Загороднюк Л. Х. Формулировка направления и темы исследования, подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Контроль и консультирование по вопросам проведения эксперимента и написание статьи.

Бочарников А. Л. Проведение эксперимента, написание, редактирование и оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Al MamuriSaad Khalil Shadid – Selection of the theoretical base for the experiment. Conducting an experiment. Approbation of the obtained results, writing an article.

Olga M. Shemetova – Selection of the theoretical base for the experiment. Conducting an experiment. Approbation of the obtained results.

Lilia Kh. Zagorodnuk – Formulation of the direction and topic of the research, selection of the theoretical basis for the experiment. Supervising and advising on the conduct of the experiment and the writing of the paper.

Andrey L. Bocharnikov – Carrying out the experiment, writing, editing and layout of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Шеметова Ольга Михайловна – аспирантка кафедры механического оборудования, SPIN-код: 2117-1054.

Загороднюк Лилия Хасановна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительного материала-

поведения, изделий и конструкций, SPIN-код: 1205-0982.

Бочарников Андрей Леонидович – студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, SPIN-код: 6866-8437.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Postgraduate Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department.

Olga M. Shemetova, Postgraduate Student of the Mechanical Equipment Department, SPIN-код: 2117-1054.

Lilia Kh. Zagorodnuk – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, SPIN-код: 1205-0982.

Andrey L. Bocharnikov, Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, SPIN-код: 6866-8437.

Научная статья
УДК 624.046.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>
EDN: HWSGNK



ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ СОРТАМЕНТА ZEMAN

С. А. Макеев^{*1}, Н. Г. Силина², М. А. Ступин³

¹ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия

² ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», г. Москва, Россия

³ АО «Судостроительный завод им. Б. Е. Бутомы», г. Керчь, Россия

makeev608079@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2915-982X>

n.silina@stako.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

79620503150@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9892-150X>

^{*}ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Сварные двутавровые балки с поперечно-гофрированной стенкой при загрузке в плоскости стенки рассчитываются на общую устойчивость в соответствии с п. 20.6.3.11 СП 294.1325800.2017, Изм. 2 от 15.06.2021 г. Здесь рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом не учитывается совместная работа сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом.

Цель работы. Показать расчетным путем на примерах шести балок, что если в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 учесть совместную работу сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом, то расчетная критическая нагрузка общей потери устойчивости гофробалки будет больше. И это увеличение тем существенней, чем меньше высота гофробалки. При этом авторы ограничились рассмотрением балок с соотношением размеров и критических нагрузок, обеспечивающих при потере общей устойчивости работу стали в упругой стадии.

Материалы и методы. Расчетным путем исследована общая устойчивость серии разрезных балок с поперечно-гофрированной стенкой тремя способами: по СП 294.1325800.2017, в ПК ЛИРА-САПР путем моделирования балок оболочечными элементами, включая пояса, стенки и опорные ребра и по СП 16.13330.2017, считая эквивалентную по критерию «общая устойчивость» сварную двутавровую балку с плоской стенкой.

Результаты исследования. Приведены данные расчета критических нагрузок первой формы потери общей устойчивости шести разрезных балок сортамента Zeman высотой 333, 500, 750, 1000, 1250, 1500 мм пролетом 6,0 м тремя способами с загрузкой верхнего пояса, равномерно распределенной нагрузкой в плоскости стенки без раскрепления сжатого пояса в пролете и раскреплением опорных сечений из плоскости стенки и от поворота относительно оси балок.

Обсуждение и выводы. Для балок с высотой стенки 333 мм учет совместной работы сжатого пояса со стенкой, растянутым поясом, опорными ребрами показал увеличение критической нагрузки в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 на 24%. При увеличении высоты балок до 900–1000 мм разница значений критических нагрузок, вычисленных с учетом совместной работы элементов балки и по СП 294.1325800.2017, нелинейно снижается до 3%. А для гофробалок с высотой 1000–1500 мм эта разница составляет менее 3%, что показывает возможность выполнения расчетов балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента Zeman с высотой 1000–1500 мм на общую устойчивость с достаточной для инженерных расчетов точностью по СП 294.1325800.2017.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сварная двутавровая балка, балка с поперечно-гофрированной стенкой, общая устойчивость балки из плоскости стенки

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

© Макеев С. А., Силина Н. Г., Ступин М. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 04.11.2022; одобрена после рецензирования 09.01.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Makeev S. A., Silina N. G., Stupin M. A. Исследование общей устойчивости сварных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента ZEMAN // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 138-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

EDN: HWSGNK

INVESTIGATION OF THE OVERALL STABILITY OF WELDED I-BEAMS WITH A CROSS-CORRUGATED WALL OF THE ZEMAN RANGE

Sergey A. Makeyev^{*1}, Natalia G. Silina², Mikhail A. Stupin³

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

²ZAO Melnikov Central R&D Institute of Construction Material Structures, Moscow, Russia

³B. E. Butoma Shipbuilding Plant JSC, Kerch, Russia

makeev608079@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2915-982X>

n.silina@stako.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

79620503150@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

^{*}corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Welded I-beams with a transversely corrugated wall when loaded in the wall plane are calculated for overall stability in accordance with paragraph 20.6.3.11 of СП 294.1325800.2017, change 2 from 06/15/2021. Here, a separate centrally compressed girder belt is calculated for overall longitudinal stability from the plane of the beam wall as an element pivotally supported at the ends. This does not take into account the joint work of the compressed belt with the wall, supporting ribs, stretched belt.

The authors set a goal to show by calculation using the examples of six beams that if, in comparison with the calculation according to СП 294.1325800.2017, the joint work of the compressed belt with the wall, support ribs, stretched belt is taken into account, then the calculated critical load of the total loss of stability of the corrugator will be greater. And this increase is the more significant, the lower the height of the corrugator. At the same time, the authors limited themselves to considering beams with a ratio of sizes and critical loads that ensure the operation of steel in the elastic stage with loss of overall stability.

Materials and methods. The general stability of split beams with a transversely corrugated wall was studied by calculation in three ways: according to СП 294.1325800.2017, in the LIRA-CAD PC by modelling beams with shell elements, including belts, walls and support ribs, and according to СП 16.13330.2017, considering a welded I-beam with a flat wall equivalent to the criterion of general stability.

The results of the study. The data of calculation of critical loads of the first form of loss of general stability of six split beams of the Zeman range with height are given 333, 500, 750, 1000, 1250, 1500 with a span of 6.0 m in three proposed ways with loading of the upper belt with a uniformly distributed load in the wall plane without loosening the compressed belt in the span and loosening the support sections from the wall plane and from rotation relative to the axis of the beams.

Discussion and conclusions. For beams with a wall height of 333 mm, taking into account the joint work of the compressed belt with the wall, stretched belt, support ribs showed an increase in critical load in comparison with the calculation according to СП 294.1325800.2017 by 24%. With an increase in the height of the beams to 900-1000 mm, the difference in the values of critical loads calculated taking into account the joint work of the beam elements and according to СП 294.1325800.2017 non-linearly decreases to 3%. And for corrugated rollers with a height of 1000-1500 mm, this difference is less than 3%, which shows that it is possible to perform calculations of beams with a transversely corrugated wall of the Zeman range with heights of 1000-1500 mm for overall stability with sufficient accuracy for engineering calculations according to СП 294.1325800.2017.

© Makeyev S. A., Silina N. G., Stupin M. A., 2023



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

KEYWORDS: welded I-beam, a beam with a transversely corrugated wall, the overall stability of the beam from the wall plane

The article was submitted 04.11.2022; approved after reviewing 09.01.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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: Makeyev S. A., Silina N. G., Stupin M. A. Investigation of the overall stability of welded i-beams with a cross-corrugated wall of the zeman range. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 138-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

ВВЕДЕНИЕ

Сварные двутавровые балки с поперечно-гофрированной стенкой (далее – гофробалки) находят применение в качестве элементов стальных каркасов, конструкций зданий и сооружений начиная с 60-х годов прошлого века. Эффективность применения гофробалок показана в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6]. При этом находят применение гофробалки как с синусоидальным профилем стенки¹, так и с профилем треугольной, трапециевидной² и других форм [7, 8]. Известно применение изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов с поперечно-гофрированными стенками в мостостроении, кораблестроении³, гидротехнических сооружениях [9, 10].

В соответствии с существующими нормативными документами (СП 16.13330.2017, СП 294.1325800.2017) изгибаемые балки, в том числе гофробалки, следует рассчитывать на общую устойчивость.

Так, в п. 20.6.3.11 СП 294.1325800.2017, Изм. 2 от 15.06.2021, рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки не гофробалка как таковая, а отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом не учитывается наличие стенки, опорных ребер, растянутого пояса. Авторы считают, что если в расчете по СП 294.1325800.2017 учесть наличие стенки, опорных ребер, растянутого пояса, то несущая способность гофробалки по критерию «общая устойчивость» определенным образом повысится.

Цель работы. Показать расчетным путем, что если в указанном расчете по СП 294.1325800.2017 учесть совместную работу сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом, то расчетная критическая нагрузка будет больше. И это увеличение тем существенней, чем меньше высота гофробалки.

При этом авторы ограничились рассмотрением балок с соотношением размеров и критических нагрузок, обеспечивающих при потере общей устойчивости работу стали в упругой стадии.

Для достижения поставленной цели в статье даны три разных способа расчета на общую устойчивость при изгибе в плоскости стенки серии из шести гофробалок сортамента австрийской компании Zeman⁴ разной высоты: WTB-333, WTB-500, WTB-750, WTB-1000, WTB-1250, WTB-1500.

Сортмент гофробалок компании Zeman был выбран для анализа вследствие того, что эта компания является крупнейшим производителем гофробалок в Европе, а также лидером по изготовлению и распространению автоматизированных линий⁵ по производству гофробалок собственного производства.

Следует акцентировать внимание на том, что в отличие от Эйлера, рассматривавшего устойчивость идеальных систем, расчеты общей продольной устойчивости при центральной сжатии стержней, расчеты общей устойчивости балок по СП 16.13330.2017 и СП 294.1325800.2017 проводятся по эмпирическим зависимостям, учитывающим несовер-

¹ <https://patents.google.com/patent/RU2767006C1/ru> (дата обращения: 13.09.2022)

² <file:///C:/Users/User/Downloads/autoref-issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-stalnykh-balok-i-kolonn-iz-dvutavra-s.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

³ <http://library.nsa.ru/Ю.А.%20Шиманской%20Справочник%20по%20строительной%20механике%20корабля%201.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

⁴ https://alfacelik.com.tr/wp-content/uploads/2017/10/e_sinbeam.pdf (дата обращения: 13.09.2022)

⁵ <http://www.modul-proekt.ru/zeman.html> (дата обращения: 13.09.2022)

шенства реальных конструкций (случайные эксцентриситеты, начальные искривления, погиби оси, п. 7.1.7 СП 294.1325800.2017).

Первый способ. Расчет гофробалок на общую устойчивость в конечно-элементном ПК «ЛИРА-САПР» как оболочечных пространственных систем по Эйлеру (идеальные системы). Здесь учитывается совместная работа всех элементов гофробалок (сжатый, растянутый пояса, гофрированная стенка, опорные ребра).

Второй способ. Расчёт гофробалок на общую устойчивость по СП 294.1325800.2017, п. 20.6.3.11, Изм. 2 от 15.06.2021. Здесь рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом продольная сжимающая сила в расчетном поясе определяется как $N = M/h$, где M – максимальный изгибающий момент в средней трети длины балки между точками раскрепления пояса из плоскости стенки, h – расстояние между центрами тяжести сечений поясов. Такой расчет дает заниженное значение критической нагрузки ввиду того, что не учитывает поддерживающий эффект от наличия гофрированной

стенки, наличия опорных ребер, растянутого пояса [11, 12].

Третий способ. Расчёт гофробалок на общую устойчивость по п. 8.4.1, Приложение 0 Ж, СП16.13330.2017 по авторскому алгоритму. Здесь, как и в первом способе, учитывается совместная работа всех элементов гофробалок (сжатый, растянутый пояса, гофрированная стенка, опорные ребра).

Так как СП16.13330.2017 регламентирует расчёт сварных двутавровых балок с плоской стенкой, расчёт гофробалок предложено выполнять следующим образом:

1) построение оболочечных конечно-элементных моделей двух сварных двутавровых балок с равными габаритами и размерами поллок, одна из которых имеет гофрированную стенку заданной толщины, а вторая плоскую;

2) подбор путем последовательных численных расчётов, толщины стенки балки с плоской стенкой, при которой гофробалка и балка с плоской стенкой имеют одинаковую, с заданной точностью, нагрузку первой формы потери общей устойчивости; далее такая балка с плоской стенкой называется эквивалентной балкой;

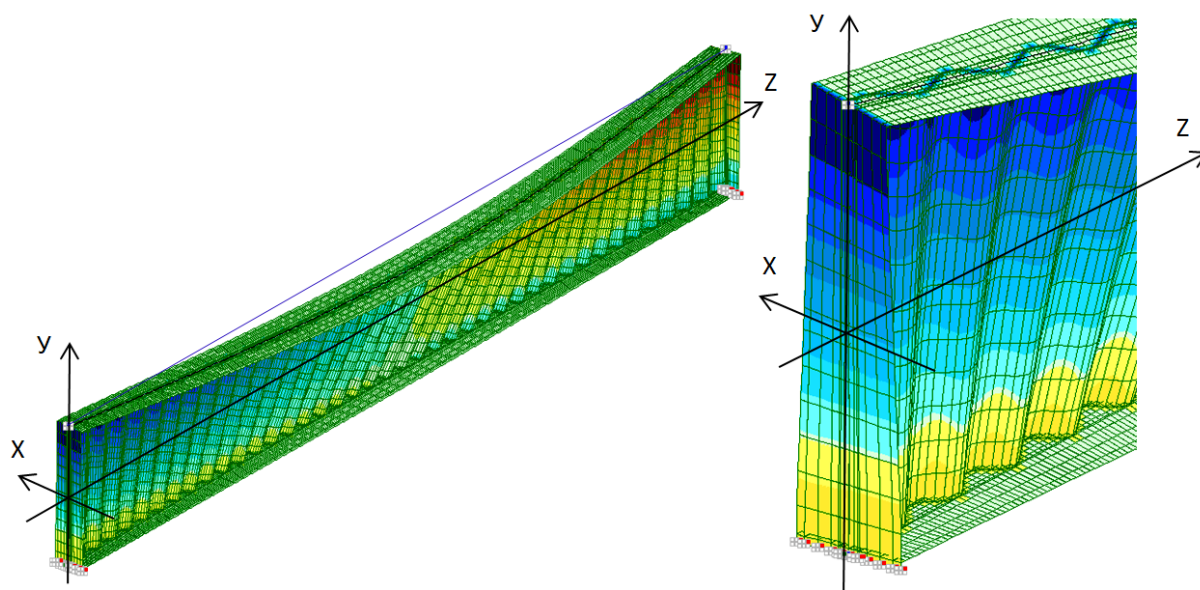


Рисунок 1 – Первая форма общей потери устойчивости гофробалки с укрупненным видом на деформации опорного ребра
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The first form of the general loss of stability of the corrugator with an enlarged view of the deformation of the support rib
Source: compiled by the authors.

3) расчет несущей способности эквивалентной балки на общую устойчивость по п. 8.4.1 СП16.13330.2017, Приложение Ж как сварной двутавровой балки с плоской стенкой.

Таким образом, третьим способом рассчитывались не гофробалки, а эквивалентные двутавровые балки с плоской стенкой, имеющие равные исследуемым гофробалкам несущие способности по критерию «общая устойчивость».

Для пояснения термина «поддерживающий эффект» от совместной работы элементов гофробалки при выходе сжатого пояса из плоскости стенки при расчете по СП 294.1325800.2017 приведен рисунок 1, где представлена первая форма потери устойчивости произвольной гофробалки.

На рисунке 1 отчетливо видно, что при выходе сжатого пояса из плоскости стенки:

- включаются в работу стенки с нижним поясом, которые препятствуют выходу сжатого пояса из плоскости стенки, то есть поддерживают сжатый пояс;

- включаются в работу опорные ребра, которые, поворачиваясь относительно вертикальной оси Y , также препятствуют выходу сжатого пояса из плоскости стенки, то есть тоже поддерживают сжатый пояс.

Таким образом, сжатый пояс в расчетной схеме по СП 294.1325800.2017 на самом деле имеет упругое опирание по концам – опоры отдельно взятого сжатого пояса имеют угловую жесткость относительно оси Y в местах соединения сжатого пояса с опорными ребрами. При этом в пролете сжатый пояс поддерживается стенкой и растянутым поясом за счет совместной работы.

Таблица 1
Параметры исследуемых гофробалок
Источник: составлено авторами.

Table 1
Parameters of the studied welded I-beam
Source: compiled by the authors.

Тип гофры	Высота (амплитуда) гофры f , мм	Период гофры A , мм	Толщина полки t_p , мм	Ширина полки, мм	Толщина стенки t_w , мм	Пролет балки l_{ep} , мм	Толщина опорного ребра, мм
Синусоидальный	± 20	145	10	200	2,5	6200	8

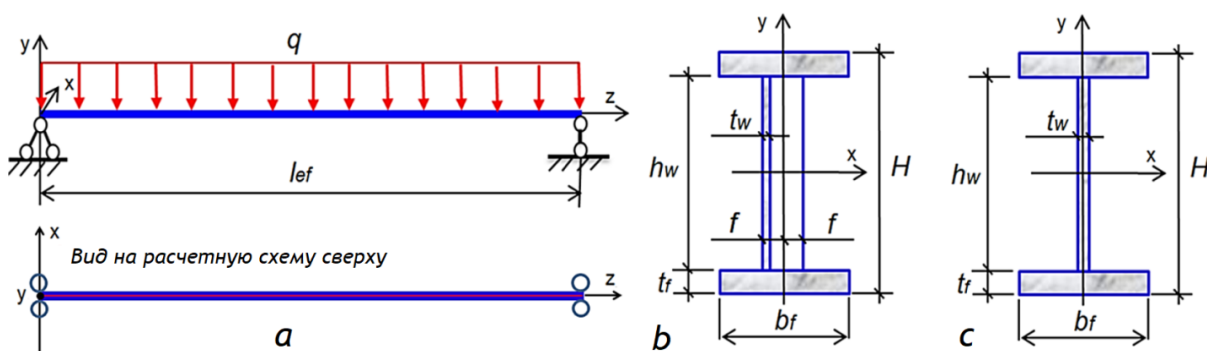


Рисунок 2 – Расчетная схема исследуемых балок:
а – расчётная схема загрузки;
б – сечение гофробалки;
с – сечение эквивалентной двутавровой балки с плоской стенкой
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Design scheme of the studied beams
а - design scheme of loading beams
б - the cross section of corrugator
с - cross section of an equivalent I-beam with a flat wall
Source: compiled by the authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследованы шесть разрезных гофробалок с синусоидально гофрированными стенками сортамента Zeman⁶ с высотами стенки с высотами стенок $h_w = 333$ мм (WTB-333), 500 мм (WTB-500), 750 мм (WTB-570), 1000 мм (WTB-1000), 1250 мм (WTB-1250), 1500 мм (WTB-1500).

При этом равномерно распределенная нагрузка q прикладывалась к верхнему поясу гофробалок в плоскости стенки без раскрепления сжатого пояса в пролете и раскреплением опорных сечений от перемещений из плоскости стенки и от поворота относительно оси балок.

Остальные геометрические параметры равны для всех исследуемых балок и приведены в таблице 1. На рисунке 2 представлена расчетная схема балок с реализацией условий закрепления опорных сечений балок

по СП 16.13330.2017, Приложение Ж, п. Ж.1: опорные сечения закреплены от боковых смещений и поворота относительно оси балок.

Выбор параметров исследуемых балок продиктован принятым условием работы стали в упругой стадии при достижении нагрузки критических значений первой формы общей потери устойчивости: максимальные нормальные напряжения в полках действуют в гофробалке с высотой стенки $h_w = 333$ мм и составляют ± 173 МПа, с увеличением высоты балок нормальные напряжения в полках при потере общей устойчивости уменьшаются.

Представим более подробно результаты расчета критических нагрузок вторым и третьим способами на примере гофробалки с высотой стенки $h_w = 333$ мм, по классификации сортамента Zeman это балка WTB-333.

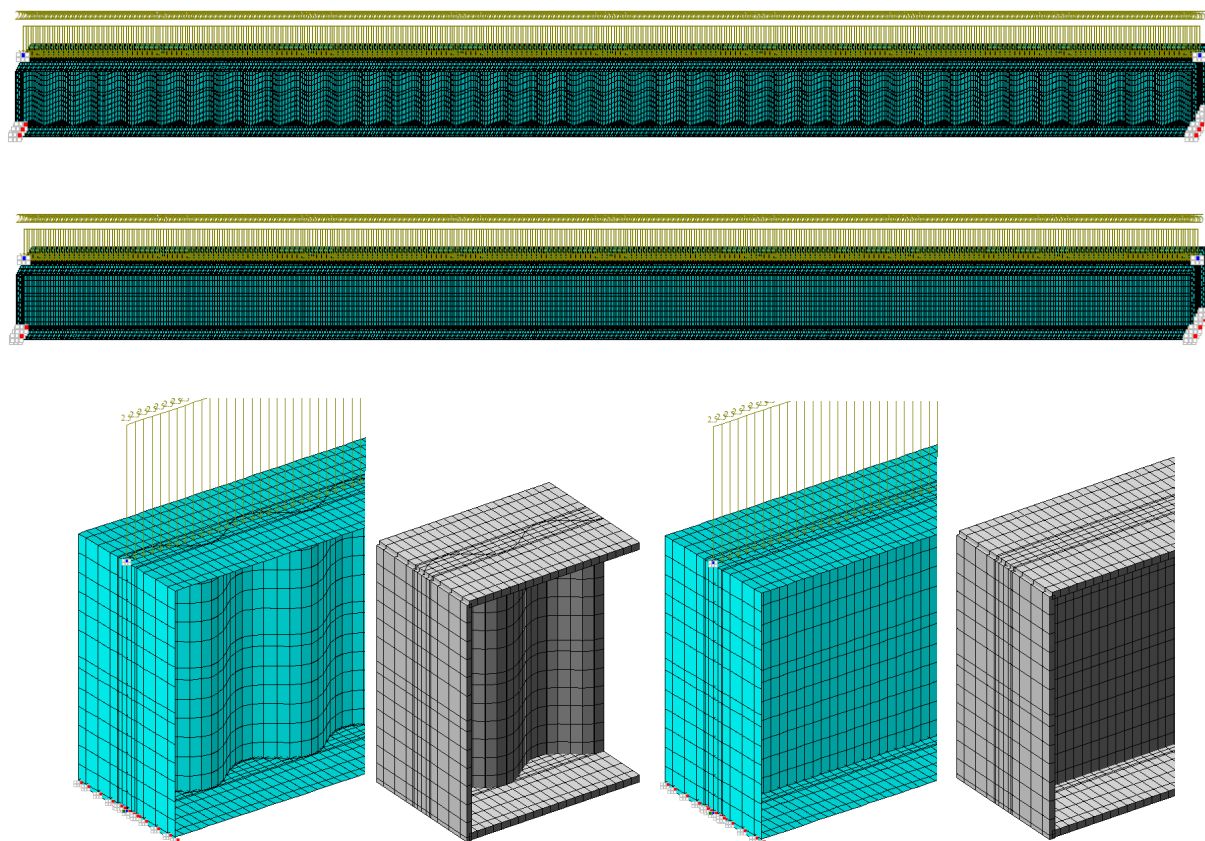


Рисунок 3 – Оболочечные модели исследуемых балок в ПК «ЛИРА-САПР» с укрупненными видами опорных участков
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Shell models of the studied beams in the LIRA-CAD PC with enlarged types of support sections
Source: compiled by the authors.

⁶ <http://buildingbook.ru/download/Sin-beam.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

Для этого построены две оболочечные модели разрезных балок с загрузкой верхнего пояса равномерно распределенной нагрузкой $q = 2,5$ тс/м без раскрепления сжатого пояса (рисунок 3):

- модель гофробалки с параметрами по таблице 1;

- модель двутавровой балки с плоской стенкой с такими же, как у расчетной гофробалки высотой стенки и размерами поясов.

Путём итерационных расчётов подбиралась толщина плоской стенки, при которой потеря общей устойчивости гофробалки и двутавровой балки с плоской стенкой происходила одновременно (случай идеальных систем с рассмотрением только первой формы потери общей устойчивости по Эйлеру). В результате нескольких численных итераций определена требуемая толщина плоской стенки, которая составила 7,4 мм (погрешность в определении критической нагрузки гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой составила 0,13 % – достаточный процент эквивалентности).

При этом коэффициент потери общей устойчивости балок по первой форме составил $\lambda_1 = 1,076$ (это число, в которое следует увеличить заданную нагрузку, чтобы балки потеряли общую устойчивость). В соответствии с результатами численного расчёта, критическая нагрузка по Эйлеру (идеальные системы) $q_{cr \text{ ЛИРА}}$ для исследуемой гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой толщиной 7,4 мм составила 2,69 тс/м:

$$q_{cr \text{ ЛИРА}} = q \cdot \lambda_1 = 2,5 \cdot 1,076 = 2,69 \frac{\text{тс}}{\text{м}}. \quad (1)$$

Определённая таким образом толщина стенки эквивалентной балки обеспечивает равенство критических нагрузок, соответствующих первой форме потери общей устойчивости исследуемых балок как идеальных систем с учетом совместной работы всех элементов балок, включая опорные ребра, стенку, растянутый пояс.

Дальнейшие вычисления производились в соответствии с п. 8.4.1 СП 16.13330.2017 и Приложением Ж с определением критической нагрузки первой формы потери общей устойчивости

эквивалентной двутавровой балки с учетом неидеальностей.

При этом коэффициент α определён по формуле для сварных двутавровых балок с плоской стенкой в соответствии с Приложением Ж, формула Ж.5 СП 16.13330.2017:

$$\alpha = 8 \left(\frac{l_{ef} t_f}{h b_f} \right)^2 \cdot \left(1 + 0,5 \frac{h t^3}{b_f t_f^3} \right) = 8 \left(\frac{6200 \cdot 10}{343 \cdot 200} \right)^2 \cdot \left(1 + 0,5 \frac{343 \cdot 7,4^3}{200 \cdot 10^3} \right) = 8,81. \quad (2)$$

Здесь h – расстояние между центрами тяжести поясов, b_f – ширина полки, t_f – толщина полки, l_{ef} – расчётная длина балки (рис. 1).

Далее вычислен коэффициент ψ по формуле из таблицы Ж.1 СП 16.13330.2017:

$$\psi = 1,6 + 0,08\alpha = 2,304. \quad (3)$$

Далее определён коэффициент φ_1 :

$$\varphi_1 = \psi \frac{I_y}{I_x} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R_y} = 3,84 \cdot \frac{1334,46}{14045,34} \cdot \left(\frac{343}{6200} \right)^2 \cdot \frac{206000}{240} = 0,575. \quad (4)$$

Здесь:

$$J_x = (2 \cdot (200 \cdot 10^3 / 12 + 200 \cdot 10 \cdot (333/2)^2) + 7,4 \cdot 343^3 / 12) / 1000 = 14045,34 \text{ см}^4,$$

$$J_y = (2 \cdot 10 \cdot 200^3 / 12 + 343 \cdot 7,4^3 / 12) / 10000 = 1334,46 \text{ см}^4$$
 – моменты инерции сечения эквивалентной балки с плоской стенкой относительно горизонтальной x и вертикальной y центральной осей сечения (см. рисунок 1);

$E = 206000$ МПа, $R_y = 240$ МПа – модуль упругости и расчетное сопротивление примененной стали (С245).

Так как полученный по формуле (3) коэффициент $\varphi_1 \leq 0,85$ то значение φ_b принято равным $\varphi_b = \varphi_1 = 0,575$.

Используя полученный коэффициент φ_b , по п. 8.4.1 СП 16.13330.2017 определена критическая нагрузка на эквивалентную двутавровую балку ($W_{cx} = J_x / (H/2) = 2599,5 / (26,1/2) = 199,2 \text{ см}^3 = 199200 \text{ мм}^3$, 3 – момент сопротивления сечения балки относительно горизонтальной центральной оси x):

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c} \leq 1 \Rightarrow M_{xкр} = \varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c = q_{cr СП 16} * \frac{l e f^2}{8} \Rightarrow q_{cr СП 16} = 8 * \frac{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c}{l e f^2},$$

$$q_{cr СП 16} = 8 * \frac{0,575 \cdot 795777 \cdot 240 \cdot 0,95}{6200^2} = 2,321 \frac{H}{мм} = 2,172 \frac{mc}{м}. \quad (5)$$

Равенство критических нагрузок идеальных гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой дают право констатировать, что нагрузка $q_{cr, СП 16} = 2,172$ тс/м является искомой критической для исследуемой гофробалки нагрузкой по критерию «общая устойчивость», определенной по третьему способу.

Для сравнения была определена критическая нагрузка потери общей устойчивости по п. 20.6.3.11 СП 294.1325800.2017 (второй спо-

соб). Полученное значение критической нагрузки составило 1,67 тс/м.

Далее аналогичным образом тремя способами были определены значения критических нагрузок первой формы потери общей устойчивости гофробалок сортамента Zetap с высотами стенок $h = 500$ мм (WTB-500), 750 мм (WTB-570), 1000 мм (WTB-1000), 1250 мм (WTB-1250), 1500 мм (WTB-1500).

Таблица 2

Результат расчётов гофробалок на общую устойчивость

Источник: составлено авторами.

Table 2

The result of calculations of welded I-beams for overall stability

Source: compiled by the authors.

№	Высота стенки, мм	Толщина плоской стенки эквивалентной двутавровой балки, мм	Критическая нагрузка по СП 16.13330.2017, тс/м (третий способ)	Значения по СП 16 принято за 100 %	Критическая нагрузка по СП 294.1325800.2017, тс/м (второй способ)	% от СП 16	Критическая нагрузка по Эйлеру (ПК «ЛИРА-САПР», тс/м (первый способ)	% от СП 16
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	333	7.4	2.17	100	1.67	77	2.69	124
2	500	7.4	2.79	100	2.48	89	3.31	119
3	750	7.9	3.86	100	3.69	96	4.38	113
4	1000	9	5.04	100	4.90	97	5.51	109
5	1250	10	6.24	100	6.12	98	6.66	107
6	1500	10.7	7.44	100	7.33	99	7.78	105

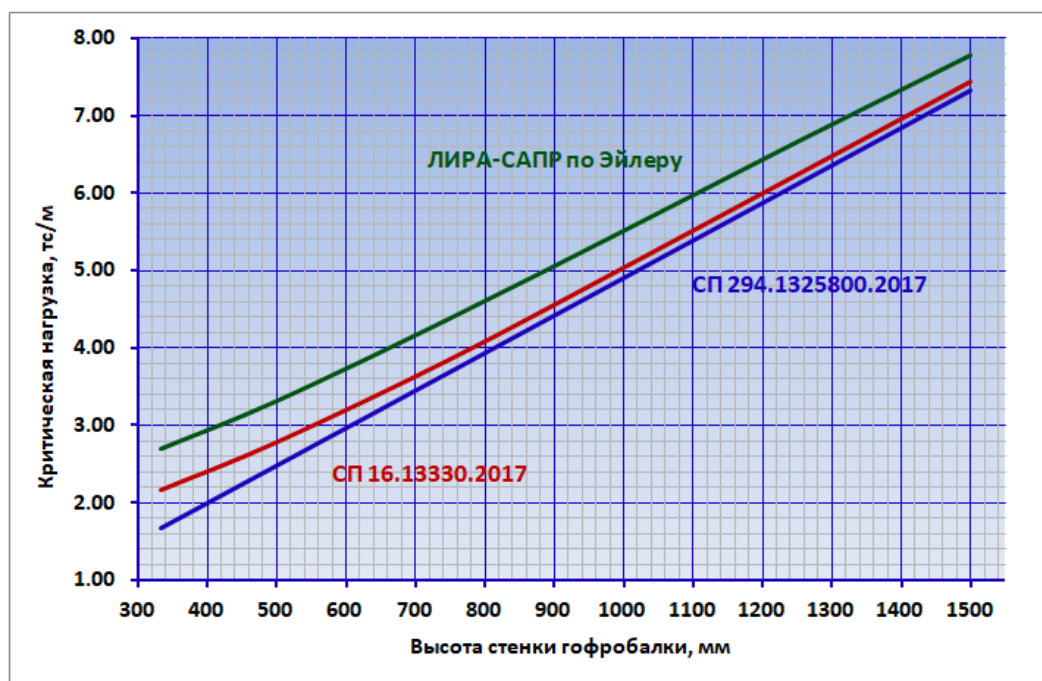


Рисунок 4 – Зависимость критических нагрузок гофробалок от высоты стенки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of critical loads of corrugated rollers on the height of the wall
Source: compiled by the authors.

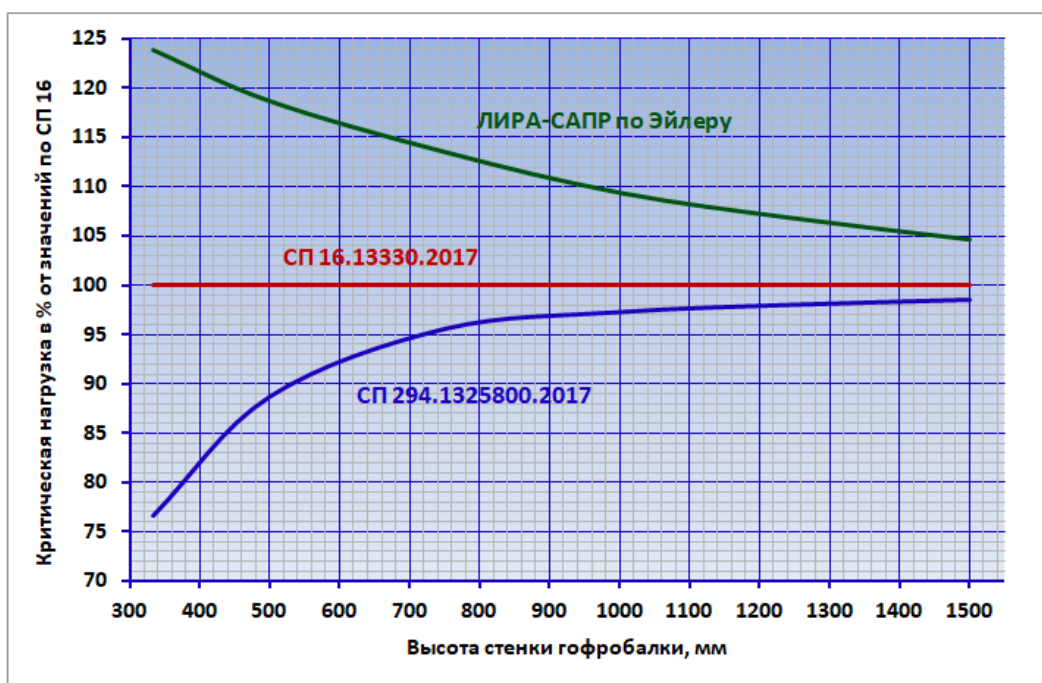


Рисунок 5 – Зависимость критических нагрузок, вычисленных в ЛИРА-САПР и СП 294 от высоты стенки в процентах относительно значений, вычисленных по СП 16.13330.2017
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the critical load calculated in LIRA-CAD on the welded I-beam according to the criterion of general stability on the height of the wall relative to the value of SP 16.13330.2017
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчётов критических нагрузок тремя рассматриваемыми способами в тс/м для серии исследуемых гофробалок представлены в таблице 2 (колонки 4, 6, 8) и на рисунке 4.

Для оценки относительной разницы между значениями критических нагрузок тремя представленными методами результаты приведены к относительным величинам.

При этом за 100% приняты значения критических нагрузок, полученные третьим способом по СП 16.13330.2017 (колонки 4, 5).

В графическом виде результаты расчетов в относительных критических нагрузках в процентах приведены на рисунке 5 (колонки 7, 9 таблицы 2).

ОБСУЖДЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов расчетов (см. таблицу 2, рисунки 4, 5) показывает, что учет совместной работы элементов гофробалок при расчете критической нагрузки общей устойчивости по СП 16.13330.2017 в сравнении с аналогичными расчетами по СП 294.1325800.2017 имеет существенное значение при малой высоте балок и нелинейно снижается по мере увеличения высоты балок.

Сформулированы основные выводы:

1. Для всех исследуемых гофробалок сортамента Zemaп наибольшие значения критических нагрузок по критерию «общая устойчивость» получены при расчёте на устойчивость по Эйлеру в ПК «ЛИРА-САПР». Это обусловлено тем, что при расчёте на устойчивость в ПК «ЛИРА-САПР» гофробалки представлены идеальными системами без учета несовершенств конструкций.

2. Для всех исследуемых гофробалок наименьшие значения критических нагрузок получены при расчёте по СП 294.1325800.2017. Это объясняется тем, что здесь вместо гофробалки на общую устойчивость рассчитывается отдельно взятый сжатый пояс как центрально сжатый стержень без учета совместной работы пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом.

3. Для балок с высотой стенки 333 мм учет совместной работы сжатого пояса со стенкой, растянутым поясом, опорными ребрами показал максимальное увеличение критической нагрузки в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 на 24%. При увеличении

высоты балок до 900–1000 мм разница значений критической нагрузки, вычисленной с учетом совместной работы элементов балки и по СП 294.1325800.2017 нелинейно снижается до 3%. Это объясняется тем, что при выходе сжатого пояса из плоскости стенки все соединенные с поясом элементы балки подвергаются кручению относительно оси балки, а жесткость на кручение соединенных со сжатым поясом элементов балки снижается по мере увеличения высоты балки.

4. Для гофробалок с высотой 1000–1500 мм эта разница составляет менее 3%, что показывает возможность выполнения расчетов балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента Zemaп с такими высотами на общую устойчивость с достаточной для инженерных расчетов точностью по СП 294.1325800.2017.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максимов Ю. С. Стальные балки с тонкой гофрированной стенкой – эффективный вид несущих конструкций производственных зданий / Ю. С. Максимов, Г. М. Остриков // Промышленное строительство. 1984. № 4. С. 10–11.
2. Дмитриева Т. Л. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4(15). С. 132–139.
3. Брянцев А.А. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях / А. А. Брянцев, В. Э. Абсиметов, В. В. Лапин // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 3(54). С. 93–104.
4. Заборова Д. Д., Дунаевская Ю. П. Преимущества и особенности применения гофробалки в строительстве / Д. Д. Заборова, Ю. П. Дунаевская // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 7(22). С. 36–53.
5. Тишков Н. Л. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой / Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, И. Л. Шипелев, М. Б. Устименко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22, № 2. С. 104–111.
6. Остриков Г. М., Максимов Ю. С., Долинский В. В. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой / Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов, В. В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 1. С. 68–70.
7. Denan F. The study of lateral torsional buckling behavior of beam with trapezoid web steel section by experimentally and finite element analysis / F. Denan, M.H. Osman, S. Saad // IJRRAS 2 (3). March. 2010. PP. 232-240.

8. Denan F. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior / F. Denan, K. K. Shoong, N. S. Hashim, C. W. Ken // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. № 9. pp. 463–472.

9. Васильев А. Л. Прочные судовые гофрированные переборки / А. Л. Васильев, М. К. Глозман, Е. А. Павлинова, Н. В. Филиппио. Л.: Судостроение, 1964. 316 с.

10. Максимов Ю. С. Легкие стальные конструкции покрытий производственных зданий // *Экспресс информация*. Алма-Ата: КазЦНТИС Госстроя КазССР. 1987. 41 с.

11. Макеев С. А. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость / С. А. Макеев, Н. Г. Силина // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 12. С. 50–58.

12. Макеев С. А. Методика расчета сварных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой на общую устойчивость / С. А. Макеев, Н. Г. Силина, А. А. Комлев, С. А. Матвеев // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 2. С. 4–9.

REFERENCES

1. Maksimov Ju. S., Ostrikov G. M. Stal'nye balki s tonkoj gofrirovannoj stenкой – jeffektivnyj vid nesushhih konstrukcij proizvodstvennyh zdaniy [Steel beams with a thin corrugated wall – an effective type of load-bearing structures of industrial buildings]. *Promyshlennoe stroitel'stvo*. 1984; 4: 10–11. (In Russ.)

2. Dmitrieva T. L., Ulambajar H. Ispol'zovanie balok s gofrostenкой v sovremennom proektirovanii [The use of beams with a corrugated wall in modern design]. *Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2015; 4(15): 132–139. (In Russ.)

3. Brjancev A. A., Absimetov V. Je., Lalin V. V. Jeffektivnost' primeneniya dvutavrov s gofirovannyimi stenkami v proizvodstvennyh zdaniyah [The effectiveness of the use of I-beams with corrugated walls in industrial buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2017; 3(54): 93–104. (In Russ.)

4. Zaborova D. D., Dunaevskaja Ju. P. Preimushhestva i osobennosti primeneniya gofro-balki v stroitel'stve [Advantages and features of the use of corrugated beams in construction]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2014; 7(22):36–53. (In Russ.)

5. Tishkov N. L., Stepanenko A. N., Shipilev I. L., Ustimenko M. B. Sovershenstvovanie konstrukcii stal'noj dvutavrovoj balki s tonkoj poperechno-gofirovannoj stenкой [Improving the design of a steel I-beam with a thin transverse corrugated wall]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2020; T. 22. no 2:104–111. (In Russ.)

6. Ostrikov G. M., Maksimov Ju. S., Dolinskij V. V. Issledovanie nesushhej sposobnosti stal'nyh dvutavrovых balok s vertikal'no gofrirovannoj stenкой [Investigation of the bearing capacity of steel I-beams with a vertically corrugated wall]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 1983; 1: 68–70. (In Russ.)

7. Denan F., Osman M. H., Saad S. The study of lateral torsional buckling behavior of beam with trapezoid web steel section by experimentally and finite element analysis. *IJRRAS*. 2010. 2 (3). March: 232–240.

8. Denan F., Shoong K. K., Hashim N. S., Ken C. W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019; 9:463–472.

9. Vasil'ev A. L., Glozman M. K., Pavlinova E. A., Filippio N. V. *Prochnye sudovye gofrirovannye pereborki* [Durable ship corrugated bulkheads]. L.: Sudostroyeniye, 1964. 316 p. (In Russ.)

10. Maksimov Ju. S. Legkie stal'nye konstrukcii pokrytij proizvodstvennyh zdaniy [Light steel structures of coatings of industrial buildings]. *Jekspress informacija*. Alma-Ata: KazCNTIS Gosstroja KazSSR. 1987. 41 p. (In Russ.)

11. Makeyev S. A., Silina N. G. Razrabotka metodiki utochnennogo rascheta gofrobalk na obshhuyu ustojchivost' [Development of a methodology for the refined calculation of corrugated rollers for general stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 12: 50–58. (In Russ.)

12. Makeyev S. A., Silina N. G., Komlev A. A., Matveyev S. A. Metodika rascheta svarynyh dvutavrovых balok s poperechno-gofirovannoj stenкой na obshhuyu ustojchivost' [Method of calculation of welded I-beams with a transverse corrugated wall for general stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022; 2: 4–9. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Макеев С. А. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, обоснование и структурирование методики расчета.

Силина Н. Г. Обзор основных методов расчёта гофробалок на общую устойчивость при поперечном изгибе, анализ результатов расчетов, формулировка выводов.

Ступин М. А. Описание материалов и методов для расчета исследуемых конструкций, проведение расчётов, анализ результатов.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Sergey A. Makeyev. Formation of the research direction, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm, justification and structuring of the calculation methodology.

Natalia G. Silina. Overview of the main methods of calculating corrugated rollers for general stability in transverse bending, analysis of calculation results, formulation of conclusions.

Mikhail A. Stupin. Description of materials and methods for the calculation of the studied structures, calculations, analysis of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Александрович Макеев – д-р техн. наук, доц, SPIN-код: 6262-3790.

Наталья Геннадьевна Силина – исполнительный директор, SPIN-код: 7426-6233.

Михаил Александрович Ступин – ведущий инженер.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Makeyev – Dr. of Sci., Associate Professor, SPIN-код: 6262-3790.

Natalia G. Silina – Executive Director, SPIN-код: 7426-6233.

Mikhail A. Stupin – Leading Engineer.

Научная статья

УДК 691

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

EDN: HSOGUG



ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНОСТИ КВАРЦЕВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ

Н. М. Толыпина, Е. Н. Хахалева*, Д. А. Толыпин

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

г. Белгород, Россия

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5788-8520>hahaleva7@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4868-2181>tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9920-7180>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из проблем разработки бетонов нового поколения является обеспечение рационального гранулометрического состава смеси цемента и тонкодисперсных добавок для обеспечения плотнейшей упаковки всех частиц цементной системы. В этой связи в работе рассмотрены вопросы оптимизации дисперсной структуры кварцевого наполнителя с учетом его удельной поверхности, концентрации в составе вяжущего и водотвердого отношения.

Материалы и методы. В исследованиях применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ГОСТ 31108–2020) ЗАО «Белгородский цемент» и тонкодисперсный кварц. Образцы на прочность при сжатии испытывали на лабораторном прессе ПГМ-100 МГ4. Гранулометрический состав наполнителей определяли с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

Результаты. Проведенные исследования позволили определить, что оптимальные дозировки микродисперсного наполнителя тесно связаны с удельной поверхностью и В/Т смеси. Показано, что с ростом дисперсности кварцевого наполнителя наблюдается уменьшение диапазона оптимальных дозировок, который сужается с увеличением водотвердого отношения. Описаны механизмы структурообразования, влияющие на свойства дисперсно-оптимизированных цементных систем. С ростом удельной поверхности наполнителя снижается удельная активность единицы поверхности наполненного вяжущего, что сопровождается снижением количества кристаллизационно-коагуляционных связей между гидратными фазами цемента.

Закключение. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что для цементного камня из смешанного вяжущего водотвердое отношение является не менее существенным показателем, чем величина концентрации минеральной добавки, поэтому снижение В/Т смешанных цементов является необходимым условием для достижения заданной прочности бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральный наполнитель, дисперсность, гранулометрия кварцевого наполнителя, водотвердое отношение, прочность цементного камня

Статья поступила в редакцию 15.12.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Толыпина Н. М., Хахалева Е. Н., Толыпин Д. А. Оптимизация дисперсности кварцевого микронаполнителя // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 150-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

© Толыпина Н. М., Хахалева Е. Н., Толыпин Д. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

EDN: HSOGUG

QUARTZ MICROFILL DISPERSION OPTIMISATION

Natalia M. Tolypina, Elene N. KHakhaleva*, Daniil A. Tolypin
Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5788-8520>

hakhaleva7@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4868-2181>

tolypina.n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9920-7180>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. One of the problems of developing new generation concrete is to ensure the rational granulometric composition of a mixture of cement and fine additives to ensure the densest packing of all particles of the cement system. In this regard, the paper considers the optimization of the dispersed structure of quartz filler, taking into account its specific surface area, concentration in the composition of the binder and water-solid ratio.

Materials and methods. In the studies, Portland cement TSEM I 42.5 N (GOST 31108-2020) of ZAO Belgorod Cement and fine quartz were used. The compressive strength samples were tested on a PGM-100 MG4 laboratory press. The granulometric composition of the fillers was determined using Analysette 22 NanoTec plus laser diffraction particle size analyzer.

Results. The conducted studies have allowed to determine that the optimal dosages of microdispersion filler are closely related to the specific surface area and the V/T of the mixture. It is shown that with an increase in the dispersion of quartz filler, a decrease in the range of optimal dosages is observed, which narrows with an increase in the water-solid ratio. The mechanisms of structure formation affecting the properties of dispersed-optimized cement systems are described. With the growth of the specific surface of the filler, the specific activity of the unit of the surface of the filled binder decreases, which is accompanied by a decrease in the number of crystallization-coagulation bonds between the hydrate phases of cement.

Conclusion. The experimental data obtained confirm that for a cement stone made of a mixed binder, the water-solid ratio is no less significant than the concentration of a mineral additive, therefore, a decrease in the V/T of mixed cements is a necessary condition for achieving a given strength.

KEYWORDS: mineral filler, dispersion, granulometry of quartz filler, water-solid ratio, strength of cement stone

The article was submitted 15.11.2022; approved after reviewing 20.01.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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. Tolypina N. M., KHakhaleva E. N., Tolypin D. A. Quartz microfill dispersion optimisation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 150-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-150-157>

© Tolypina N. M., KHakhaleva E. N., Tolypin D. A., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Специалистами по строительным материалам гидратационного твердения последние годы уделяется определенное внимание проблеме разработки так называемых бетонов нового поколения. Это порошково-активированные многокомпонентные бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности с измененной топологической структурой, при оптимизированном содержании реологических и реакционно-активных наполнителей и эффективных супер- и гиперпластификаторов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Такие бетоны обладают высокими деформативно-прочностными характеристиками и долговечностью. Эти материалы могут успешно применяться в высотном строительстве, восстановительных работах, при возведении несущих и архитектурно-декоративных конструкций, при строительстве мостов и других транспортных сооружений.

К одному из принципов решения проблемы разработки порошковых бетонов можно отнести обеспечение рационального гранулометрического состава смеси цемента и тонкодисперсных добавок, которая должна обеспечивать плотнейшую упаковку всех частиц цементной системы [10, 11]. Для решения этой задачи возможны варианты: когда в пустотах вяжущего располагаются частицы наполнителя, и, наоборот, когда в пустотах наполнителя располагаются частицы вяжущего. Во всех случаях тонкость помола и вяжущего, и наполнителя должна характеризоваться различной удельной поверхностью [12, 13, 14].

При этом к наиболее важным параметрам тонкодисперсных наполнителей, определяющим их эффективность использования, относятся показатели удельной поверхности и их дозировку [15, 16]. Применение в оптимальных дозировках тонкодисперсных наполнителей не снижает, а в некоторых случаях повышает прочность наполненного цементного вяжущего, способствует экономии клинкера, оказывает демпфирующее действие, выполняет функцию центров кристаллизации и т.п. [17, 18, 19]. Однако ряд решений по проблеме обеспечения плотной упаковки цементных систем требуют дополнительного рассмотрения. Данная работа посвящена этому вопросу.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследований использовали вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ($S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$), тонкодисперс-

ный кварцевый наполнитель ($S_{уд} = 200, 500, 700, 900 \text{ м}^2/\text{кг}$) в дозировках 5, 10, 15 и 20%. Изготавливали одну серию образцов $3 \times 3 \times 3 \text{ см}$ с $B/T = 0,27$, соответствующей водопотребности цементного теста, вторую серию образцов аналогичного размера изготавливали при более высоком значении $B/T=0,3$. Через 28 сут нормального твердения образцы испытывали на лабораторном прессе ПГМ-100 МГ4 на прочность при сжатии. Гранулометрию порошкообразного кварца определяли при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве субъекта исследований использовали вяжущее с тонкодисперсным кварцевым наполнителем, широко применяемое в качестве минерального компонента в порошковых бетонах. Результаты исследований показали, что при оптимальных дозировках тонкодисперсного кварца прочность цементного камня незначительно повышается, при дальнейшем увеличении концентрации наполнителя наблюдается спад прочности. Дисперсный наполнитель при минимальной удельной поверхности $200 \text{ м}^2/\text{кг}$ проявляет наибольшую эффективность, обеспечивает повышение прочности и затем ее плавное снижение с ростом дозировки. Характер снижения прочности при сжатии цементного камня с ростом концентрации наполнителя и его удельной поверхности достаточно схож для всех составов. Повышение концентрации наполнителя до 20% и рост удельной поверхности от 500 до $900 \text{ м}^2/\text{кг}$ привело к спаду прочности при сжатии цементного камня на 8,5% ($B/T = 0,27$), а при увеличении B/T до 0,3 – снижению прочности приблизительно на 15% (рисунок 1).

С увеличением водотвердого отношения прочность цементного камня снижается более резко с ростом дозировки наполнителя и его дисперсности, чем при меньших значениях B/T (рисунок 1, б). Полученные данные показывают, что для цементного камня из смешанного вяжущего соотношение B/T является не менее важным параметром, чем степень замещения портландцемента добавкой. С увеличением водотвердого отношения целесообразно снижать дозировку вводимого наполнителя. Очевидно, что снижение B/T для бетонов, приготовленных на основе смешанных цемента, является необходимой мерой, обеспечивающей получение заданной прочности.

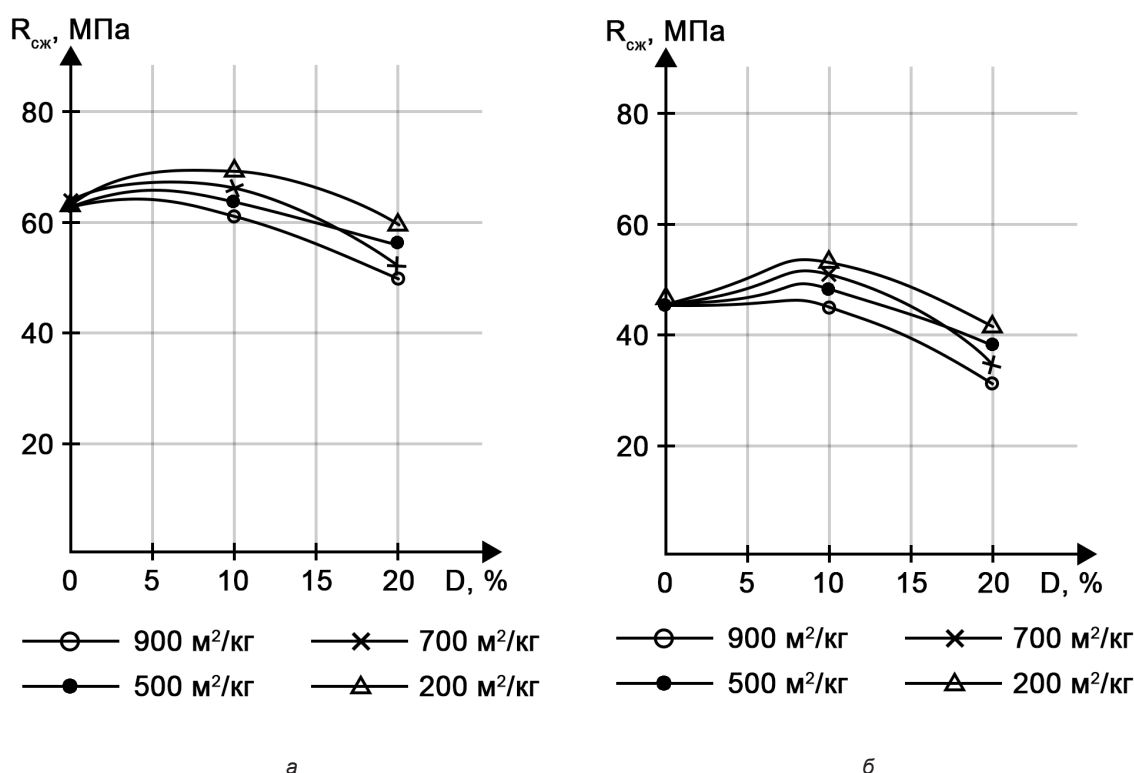


Рисунок 1 – Влияние V/T и удельной поверхности тонкодисперсного кварца на прочность при сжатии цементного камня: а – $V/T = 0,27$; б – $V/T = 0,3$
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The effect of V/T and the specific surface of fine quartz on the compressive strength of cement stone: a) $V/T = 0.27$; b) $V/T = 0.3$.
Source: compiled by the authors.

Для смешанных вяжущих нормальной плотности интервал оптимальных дозировок приблизительно 12–15%, с повышением водотвердого отношения до 0,3 диапазон оптимальных дозировок сужается до 7–9%. Чем выше дисперсность кварцевого наполнителя, тем меньше дозировка и более узкий диапазон.

В настоящее время используются различные модели упаковки частиц заполнителей в бетоне. Наиболее востребованными являются уравнения, разработанные Фуллером, Функом и Дингером [20]. Принципиальная разница между ними заключается в том, что модель Фуллера охватывает весь диапазон дисперсных частиц: от максимального размера крупного заполнителя до самых малых частиц смеси менее 10 мкм, например, вяжущего. У модели Функа и Дингера минимальный размер частиц ограничивается 100 мкм, т.е. мелким заполнителем. В этой связи модель Фулле-

ра предпочтительна для оптимизации смеси вяжущего с наполнителем. Учитывая, что количество частиц портландцемента размером более 65 мкм незначительно, добавление грубомолотого кварца с удельной поверхностью 100–200 m^2/kg позволяет восполнить недостающий диапазон частиц от 65 до 160 мкм (между вяжущим и мелким заполнителем), чтобы максимально приблизиться к гранулометрической кривой Фуллера. Это позволит повысить плотность упаковки растворной части бетона и тем самым улучшить физико-механические показатели.

Изменения удельной поверхности тонкодисперсного наполнителя специфично связаны с гранулометрией частиц. Взаимосвязь между гранулометрией наполнителя и вяжущего вызывает необходимость оптимизировать общую гранулометрию зернистых составляющих смеси для повышения плотности упаковки частиц.

По данным [21], средняя величина удельной поверхности российских цементов $S_{уд} = 327 \text{ м}^2/\text{кг}$, при этом среднее содержание частиц менее 5 мкм составляет 13,1%, 5–30 мкм – 46%, свыше 30 мкм – 40,9%, на долю частиц размером свыше 60 мкм приходится незначительное количество. Так как частицы портландцемента размером более 60 мкм не гидратируются полностью, ввод крупных частиц 50–100 мкм инертного кварцевого порошка позволит заменить портландцемент без существенного снижения прочности.

Данные лазерной гранулометрии вяжущего и кварцевого наполнителя с $S_{уд} = 100, 200$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ приведены на рисунке 2 и в таблице.

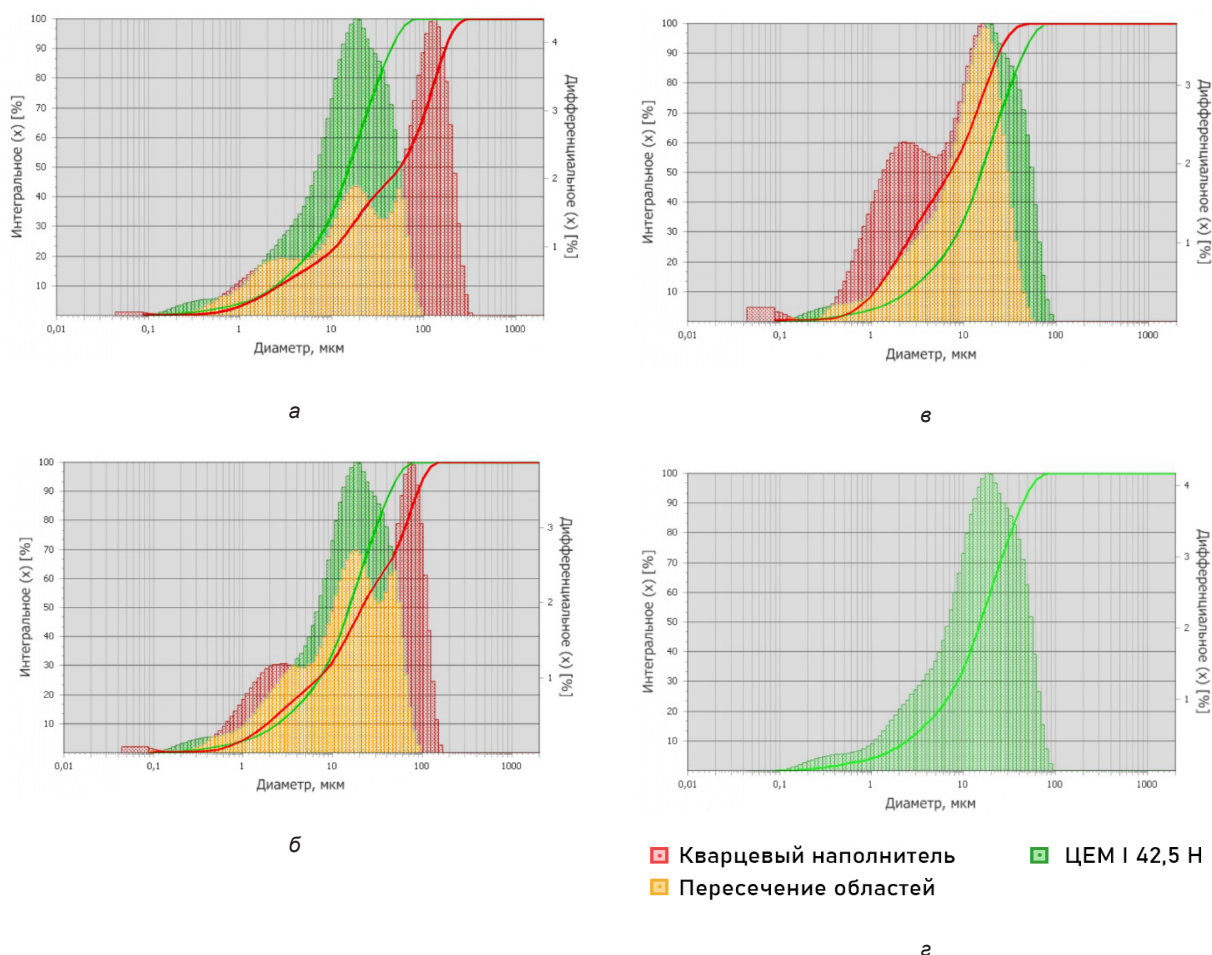


Рисунок 2 – Гранулометрия вяжущего (ЦЕМ I) и дисперсного кварца с $S_{уд}$: а – $100 \text{ м}^2/\text{кг}$; б – $200 \text{ м}^2/\text{кг}$; в – $600 \text{ м}^2/\text{кг}$; г – ЦЕМ I, $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Granulometry of CEM I and dispersed quartz with $S_{уд}$: а) $100 \text{ м}^2/\text{кг}$; б) $200 \text{ м}^2/\text{кг}$; в) $600 \text{ м}^2/\text{кг}$; г) CEM I, $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$
Source: compiled by the authors.

Таблица
Гранулометрический состав вяжущего и дисперсного кварца
Источник: составлено авторами.

Table
Granulometric composition of binder and dispersed quartz
Source: compiled by the authors.

$S_{уд}, м^2/кг$	Кол-во частиц, %, по фракциям (мкм)				
	<1	1–5	5–30	30–65	>65
тонкодисперсный кварц					
100	3,34	12,05	26,06	12,43	46,06
200	4,5	11,28	37,26	19,26	21,7
600	9,39	33,55	53,57	3,49	0
портландцемент					
320	5	12,0	43	25	15

Как видно из приведенных данных, у дисперсного кварца с $S_{уд} = 100 м^2/кг$ количество крупных частиц более 65 мкм составило почти половину (около 46%), а остальная часть приходится на частицы менее 65 мкм, сопоставимые с размером частиц портландцемента. Дальнейший помол до $S_{уд} = 200 м^2/кг$ снижает количество частиц крупных фракций более 65 мкм до 22,7%, возрастает количество частиц фракции 5–30 мкм (37, 26%). Резко меняется гранулометрический состав частиц при измельчении до $S_{уд} = 600 м^2/кг$: частицы крупных фракций более 65 мкм отсутствуют, фракций 5–30 мкм достигают максимального значения 53,57%, значительно возрастает количество мелких частиц размером 1–5 мкм. Эти данные позволяют объяснить малоэффективность кварцевого наполнителя высокой дисперсности ($S_{уд}$ свыше 500 $м^2/кг$). Несмотря на повышение активности микронаполнителя по мере увеличения степени измельчения, гранулометрический состав порошкового кварца, представленный частицами (около 87%), сопоставимыми с зернами цемента (1–30 мкм), не обеспечивает плотное заполнение пустот между частицами вяжущего. При высокой дисперсности происходит усиление агрегирования микрочастиц наполнителя, приводящее к росту количества «сухих» контактов между ними и неравномерному распределению в цементной системе. С ростом удельной поверхности наполнителя снижается удельная активность единицы поверхности наполненного вяжущего, что сопровождается снижением ко-

личества кристаллизационно-коагуляционных связей между гидратными фазами цемента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимальные дозировки микродисперсного наполнителя тесно связаны с удельной поверхностью и В/Т смеси. Целесообразно измельчение кварцевого наполнителя до удельной поверхности 200 $м^2/кг$ для использования в максимальной дозировке. При достаточно широком диапазоне степени измельчения кварцевого наполнителя (200–900 $м^2/кг$) необходимо снижать дозировку, при этом прочность изменяется мало.

Использование кварца с невысокой удельной поверхностью (200 $м^2/кг$) позволит улучшить гранулометрию смеси вяжущего с тонкодисперсным кварцевым наполнителем в соответствии с моделью Фуллера, получить более экономичное вяжущее за счет снижения энергозатрат на помол кварцевого наполнителя и его использования взамен клинкерной части.

Для цементного камня из смешанного вяжущего водотвердое отношение является важным фактором, поэтому для бетонов, приготовленных на основе смешанных цементов, снижение В/Т является необходимым условием для достижения заданной прочности.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет – 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калашников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Белякова Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47–53.

2. Sanjuan M., Andrade C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications // *Applied Sciences*. 2021, 11(12), 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

3. Azmee N. M., Shafiq N., Case Stud. Constr. Mater., Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2018, 9. doi:10.1016/j.cscm.2018.e00197

4. Ng K.M., Tam C.M., Tam V.W. Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: A Hong Kong study, *Magazine of Concrete Research*. 2010, Vol.62, No. 9, pp. 647-654. doi:10.1680/mac.9.00063

5. Shaheen E., Shrive N. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete, 2006. *ACI Materials Journal*, 103(6), pp.444-451. doi:10.14359/18222

6. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2004. Vol. 2, No. 3, 409-417. doi:10.3151/jact.2.409

7. Aravindhan J., Vijayakumar G. Studies on strength characteristics of reactive powder concrete. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016. 14(S1). 149-154.

8. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Ковалева И. А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 101–109.

9. Long G., Wang X., Xie Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. *Cement and Concrete Research*. 2002. 32(4). 601-605. doi:10.1016/S0008-8846(01)00732-3

10. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 251, 01042. doi:10.1051/mateconf/201825101042

11. Hamiruddin N. A., Razak R. A., Muhamad K. The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPC). 2018. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*. 280, 476-480. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476

12. Tikkanen J., Penttala V., Cwirzen A. Mineral powder concrete – Effects of powder content on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. 2011. 63(12). 893-903 doi:10.1680/mac.10.00048

13. Bentz D.P., Conway J.T. Computer modelling of the replacement of «coarse» cement particles by inert fillers in low w/c ratio concretes: Hydration and strength. *Cement and Concrete Research*. 2001. 31(3). 503–506. doi:10.1016/S0008-8846(01)00456-2

14. Белов В. В., Образцов И. В., Куляев П. В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 17–21.

15. Энтин З. Б., Нефедова Д. С. О дисперсности и гранулометрии российских и зарубежных цементов // Цемент и его применение. № 3. 2008. С. 86–88.

16. Айчин П. К., Уилсон У., Миндесс С. Увеличение прочности бетонов, изготовленных из смешанных цементов // Цемент и его применение. № 5. 2018. С. 67–70.

17. Калашников В. И., Москвин Р. Н., Белякова Е. А., Белякова В. С., Петухов А. В. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 113–118.

18. Moosberg-Bustnes H. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures*. 2004. 37(2). 74-81. doi:10.1617/13694

19. Дыкин И. В., Величко Е. Г., Ерёмин А. В. Порошково-активированные бетоны – многоуровнево-модифицированные цементные системы // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-4 (57). С. 37–40.

20. Белов В. В., Смирнов М. А. Строительные композиты из оптимизированных минеральных смесей: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 112 с.

21. Ананьев С. В., Калашников В. И., Суздальцев О. В., Дрянин Р. А. Влияние тонкости помола и качества кварцевого песка на прочностные свойства порошкового бетона // Наука и мир. 2014. №8 (12). С. 34–36.

REFERENCES

1. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. Be-tony novogo pokoleniya na osnove sukhikh tonkozernisto-poroshkovykh smesei [New generation concretes based on dry fine-grain-powder mixtures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012; 8 (34): 47-53. (in Russ.)

2. Sanjuan M., Andrade C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. *Applied Sciences*. 2021; 11(12): 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

3. Azmee N. M., Shafiq N., Case Stud. Constr. Mater., Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018; 9. doi:10.1016/j.cscm.2018.e00197

4. Ng K. M., Tam C. M., Tam V. W. Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: A Hong Kong study. *Magazine of Concrete Research*. 2010; Vol.62. No. 9: 647-654. doi:10.1680/mac.9.00063

5. Shaheen E., Shrive N. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete. *ACI Materials Journal*. 2006; 103 (6): 444-451. doi:10.14359/18222

6. Sadrekarimi A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004; Vol. 2, No. 3: 409-417. doi:10.3151/jact.2.409

7. Aravindhan J., Vijayakumar G. Studies on strength characteristics of reactive powder concrete. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016; 14 (S1): 149-154.

8. Tolstoy A. D., Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. Kh., Kovaleva I. A. Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [Powder concretes using man-made raw materials]. *Vestnik MGSU*. 2015; 11: 101-109. (in Russ.)
9. Long G., Wang X., Xie Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(4): 601-605. doi:10.1016/S0008-8846(01)00732-3
10. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 251, 01042. doi:10.1051/mateconf/201825101042
11. Hamiruddin N. A., Razak R.A., Muhamad K. The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPC). 2018. Diffusion and Defect Data Pt. B: Solid State Phenomena. 280, 476-480. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476
12. Tikkanen J., Penttala V., Cwirzen A. Mineral powder concrete – Effects of powder content on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. 2011; 63 (12): 893-903 doi:10.1680/mac.10.00048
13. Bentz D. P., Conway J.T. Computer modelling of the replacement of «coarse» cement particles by inert fillers in low w/c ratio concretes: Hydration and strength. *Cement and Concrete Research*. 2001; 31(3): 503–506. doi:10.1016/S0008-8846(01)00456-2
14. Belov V. V., Obratsov I. V., Kulyaev P. V. Metodologiya proektirovaniya optimal'nykh struktur tsementnykh betonov [Methodology for Designing Optimal Cement Concrete Structures]. *Stroitel'nye materialy*. 2013; 3: 17-21. (in Russ.)
15. Entin Z. B., Nefedova D. S. O dispersnosti i granulometrii rossiiskikh i zarubezhnykh tsementov [Dispersion and granulometry of Russian and foreign cements]. *Tsement i ego primeneniye*. 2008; 3: 86-88. (in Russ.)
16. Aichin P. K., Uilson U., Mindess S. Uvelichenie prochnosti betonov, izgotovlennykh iz smeshannykh tsementov [Increased strength of concretes made of mixed cements]. *Tsement i ego primeneniye*. 2018; 5. 2018: 67-70. (in Russ.)
17. Kalashnikov V. I., Moskvina R. N., Belyakova E. A., Belyakova V. S., Petukhov A. V. Vyso-kodispersnye napolnители dlya poroshkovo-aktivirovannykh betonov novogo pokoleniya [Highly dispersed fillers for next-generation powder-activated concretes]. *Si-stemy. Metody. Tekhnologii*. 2014; 2 (22):113–118. (in Russ.)
18. Moosberg-Bustnes H. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures*. 2004; 37(2): 74-81. doi:10.1617/13694
19. Dykin I. V., Velichko E. G., Eremin A. V. Poroshkovo-aktivirovannyye betony – mno-gourov-nevo-modifitsirovannyye tsementnyye sistemy [Powder-activated concretes - multilevel-modified cement systems]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2017; 3-4 (57): 37-40. (in Russ.)

20. Belov V. V., Smirnov M. A. Stroitel'nye kompozity iz optimizirovannykh mine-ral'nykh smesey: monografiya [Construction composites from optimized mineral mixtures: monograph]. Tver': TvGTU, 2012; 112. (in Russ.)

21. Anan'ev S. V., Kalashnikov V. I., Suzdal'tsev O. V., Dryanin R. A. Vliyanie tonkosti pomola i kachestva kvartseвого peska na prochnostnye svoystva poroshkovogo betona [Influence of fineness of grinding and quality of quartz sand on strength properties of powder concrete]. *Nauka i mir*. 2014; 8 (12): 34-36. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Толыпина Н. М. Постановка задач исследования. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Халалева Е. Н. Выбор методологии и методов исследования. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Толыпин Д. А. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Natalia M. Tolypina. Formulation of research tasks. Generalization of the results of the work, formalization of conclusions. Editing the article.

Elena N. Khakhaleva. Choice of methodology and research methods. Performing experimental studies, processing the results.

Daniil A. Tolypin. Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толыпина Наталья Максимовна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, SPIN-код: 4650-2537.

Халалева Елена Николаевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры строительства и городского хозяйства, SPIN-код: 7096-6955.

Толыпин Даниил Александрович – магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia M. Tolypina – Dr. of Sci., Associate Professor, Construction Materials Science, Products and Structures Department, SPIN-код: 4650-2537.

Elena N. Khakhaleva – Cand. of Sci., Associate Professor, Construction and Urban Economy Department, SPIN-код: 7096-6955.

Daniil A. Tolypin – Master's student, Construction Materials Science, Products and Structures Department.

Научная статья

УДК 691.54

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>

EDN: NYKJTH



КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО

А. В. Явинский*, И. Л. Чулкова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

le5@inbox.ru, 0000-0002-2378-3947

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Хранение золы гидроудаления на золоотвалах негативно сказывается на экологической ситуации в близлежащих населенных пунктах, отвалы постоянно пылят и загрязняют источники воды. Для решения данной проблемы предлагается использовать золу гидроудаления в качестве компонента смешанного вяжущего. Поскольку удельная поверхность золы гидроудаления различна на всей территории отвала, необходимо изучить её влияние на набор прочности смешанного вяжущего при различных условиях твердения.

Материалы и методы. Перечислено оборудование, на котором выполнялся эксперимент. Для определения удельной поверхности использовался прибор ПСХ-12, сушка золы осуществлялась в сушильном шкафу. Хранение образцов проводилось в камере нормального твердения. Представлен химический состав золы гидроудаления с ТЭЦ-5 г. Омска.

Результаты. Приведены экспериментальные данные о прочности образцов смешанного вяжущего в возрасте 1, 3, 7, 14, 21, 28, 90 сут нормального твердения и данные о прочности образцов, прошедших тепловлажностную обработку. Прочность материала смешанного вяжущего с удельной поверхностью золы гидроудаления 460–490 м²/кг при нормальных условиях твердения составляет 42,57 МПа, что не уступает контрольному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после тепловлажностной обработки наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Образцы, в которые вводилась зола гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370, 650–700 м²/кг, показывают результаты по прочности ниже, чем контрольный беззолый образец независимо от условий твердения.

Обсуждение и заключение. Обосновано, что рациональным является использование золы гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг. Его прочность при нормальных условиях твердения составляет 42,57 МПа, что не уступает контрольному беззолному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после тепловлажностной обработки наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Повышение прочности образцов из смешанного вяжущего связано с ускорением в них прохождения пуццолановой реакции, продукты которой положительно влияют на прочность получаемых изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цемент, зола гидроудаления, смешанное вяжущее, прочность, экология, строительство, удельная поверхность

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 08.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

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: Явинский А. В., Чулкова И. Л. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 158–166. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>

© Явинский А. В., Чулкова И. Л., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>
EDN: NYKJTH

KINETICS OF MIXED BINDER STRENGTH GAIN

Aleksander V. Yavinsky*, Irina L. Chulkova

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

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

le5@inbox.ru, 0000-0002-2378-3947

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The storage of pond ash at ash dumps has a negative impact on the environmental situation in the nearby settlements, dumps constantly dust and pollute water sources. To solve this problem, it is proposed to use ash from pond ash as a component of mixed binder. Since the specific surface area of pond ash is different throughout the dump, it is necessary to study its influence on the strength set of mixed binder under different curing conditions.

Materials and methods. The equipment on which the experiment was carried out is listed. To determine the specific surface ПСХ-12 device was used, ash drying was carried out in a desiccator. The samples were stored in a normal solidification chamber. The chemical composition of pond ash from TPP-5 of Omsk was presented.

Results. Experimental data on the strength of samples of mixed binder at the age of 1,3,7,14,21,28,90 days of normal hardening and data on the strength of samples after heat and humidity treatment are presented. Durability of mixed binder composition with specific surface of hydraulic ash of 460-490 m²/kg under normal hardening conditions amounts to 42.57 MPa which corresponds to natural strength. The composition with the use of pond ash 460-490 m²/kg after water removal increased strength by 12% in comparison with the control composition. Compositions with specific surface of wet pond ash 220-250, 340-370, 650-700 m²/kg show durability results lower than the control ashless composition irrespective of hardening conditions.

Discussion and conclusions. It is proved that the use of pond ash with a specific surface of 460-490 m²/kg is rational. Its strength under normal conditions of hardening is 42,57 MPa, which corresponds to the strength of the concrete. The composition with the use of wet pond ash 460-490 m²/kg after heat and moisture treatment has an increase in strength by 12% compared to the control composition. Increased strength of mixed binder compositions is associated with acceleration of pozzolanic reaction in them, the products of which have a positive effect on the strength of the products.

KEYWORDS: cement, pond ash, mixed binder, strength, construction, ecology, specific surface area

The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

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: Yavinsky A. V., Chulkova I. L. Kinetics of mixed binder strength gain. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-158-166>

© Yavinsky A. V., Chulkova I. L., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все чаще поднимается вопрос о переработке отходов тепловых электростанций (ТЭЦ). Хранение отходов ТЭЦ на золоотвалах негативно влияет на экологическую обстановку на близлежащих территориях [1, 2]. Схема воздействия отходов ТЭЦ на окружающую среду представлена на рисунке 1. Мировая практика демонстрирует богатый опыт в переработке техногенных отходов ТЭЦ в сухом виде [3, 4]. Многие ученые из Китая, Индии исследовали использование отходов ТЭЦ в качестве компонента бетона [5, 6, 7]. Большой вклад внесли и отечественные авторы, которые занимались исследованиями в области переработки отходов в строительной отрасли [8, 9, 10]. В представленных ра-

ботах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] используют золу уноса или предварительно высушенную золу гидроудаления. Сушка золы гидроудаления представляет собой энергозатратную операцию, вследствие чего стоимость сырья повышается. Использование золы гидроудаления в состоянии естественной влажности позволит снизить ее стоимость, а следовательно, и стоимость изделий, в которых она применяется.

Также для России и, в частности, Западной Сибири, важной проблемой является строительство качественного и долговечного дорожного покрытия. Покрытия из асфальта не отличаются долговечностью и морозостойкостью [11], вследствие чего из бюджета страны ежегодно направляются большие суммы на ремонт и строительство дорог, в 2022 г. было выделено 331,7 млрд руб.

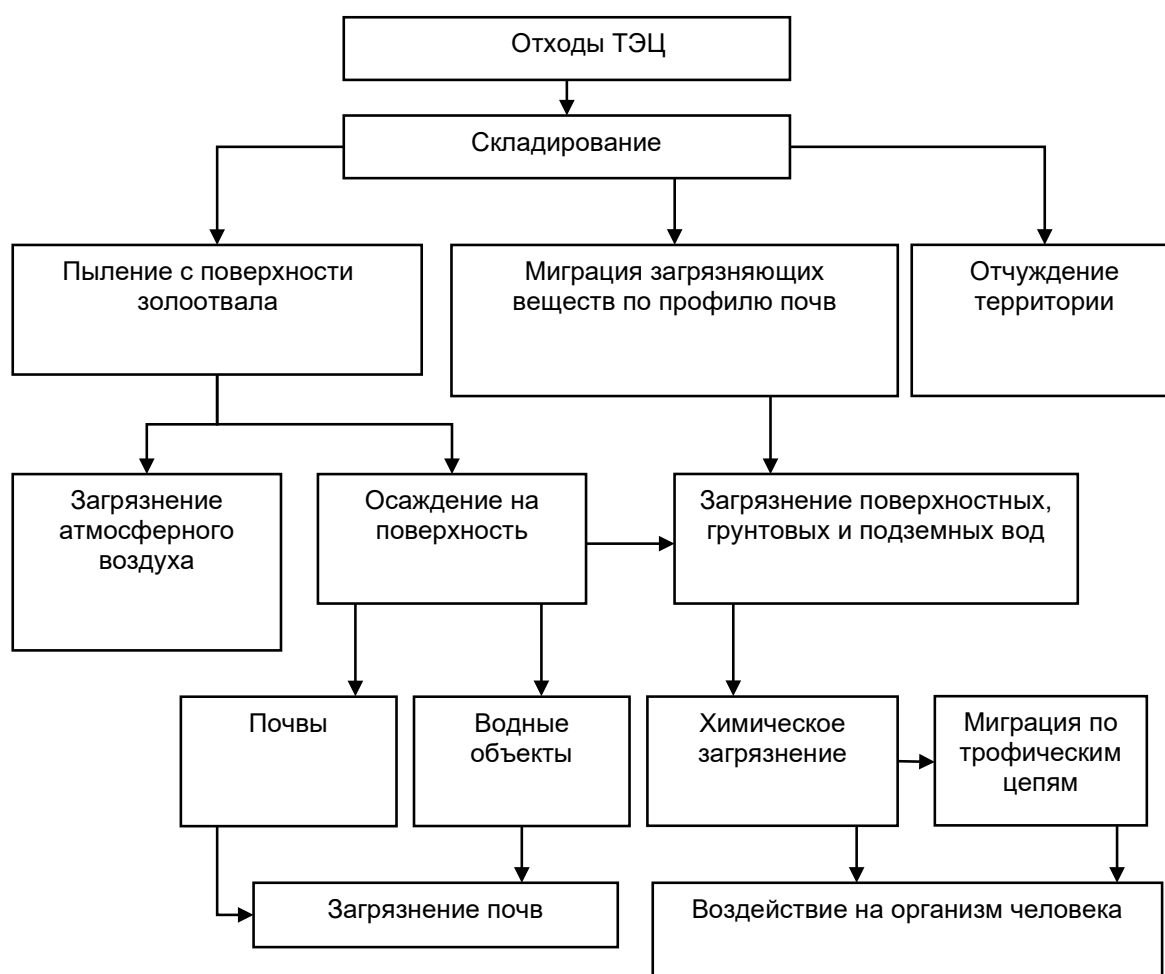


Рисунок 1 – Схема воздействия отходов ТЭЦ на окружающую среду

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme of the environmental impact of TPP waste

Source: compiled by the authors.

Дорожное покрытие из бетона обладает рядом преимуществ перед асфальтом, например, повышенной прочностью и морозостойкостью, но вследствие высоких затрат на строительство не пользуется популярностью в нашей стране [12]. Также важно отметить, что по асфальтовому покрытию можно ездить сразу после укладки, а цементобетонному необходимо время, чтобы набрать прочность.

Замене цемента и песка в бетонной смеси на золу гидроудаления посвящены работы [13, 14, 15, 16, 17, 18], однако их авторы делают акценты на химическом составе отходов ТЭЦ, а не на их удельной поверхности.

Использование золы гидроудаления во влажном виде в составе тяжелого бетона может позволить снизить его стоимость, а также улучшить экологическую обстановку в России.

Целью работы является исследование набора прочности смешанного вяжущего с заменой части цемента золой гидроудаления при различной удельной поверхности золы гидроудаления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения кинетики твердения смешанного вяжущего были запроектированы 5 составов, которые отличались удельной поверхностью золы гидроудаления, а также контрольный беззолый образец. Рациональное количество вводимой золы гидроудаления было установлено в ранее проводимых исследованиях и составляет 20% от массы цемента¹. Зола гидроудаления применялась в состоянии естественной влажности, влажность находилась высушиванием до постоянной массы и составила 42%. Удельная поверхность золы гидроудаления определялась прибором ПСХ-12, после ее высушивания до постоянной массы. Составы представлены в таблице 2.

В работе использовалась зола гидроудаления с ТЭЦ-5 г. Омска, точки отбора представлены на рисунке 2. Отбор образцов золы гидроудаления проводился из 4 точек с помощью мобильной буровой установки.

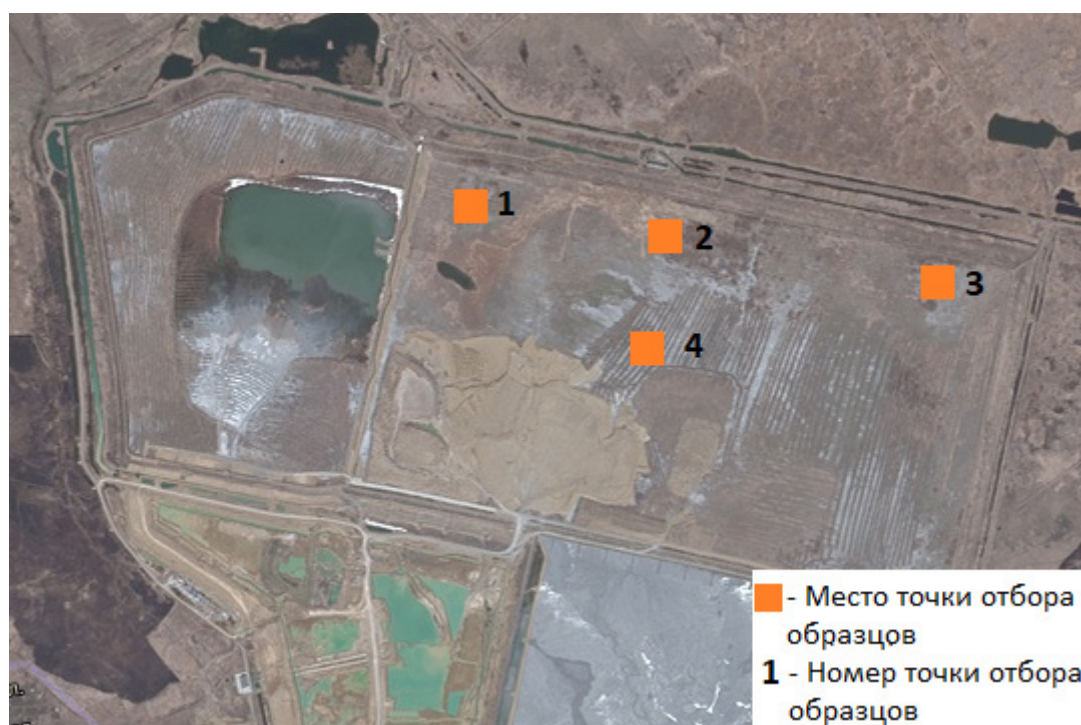


Рисунок 2 – Точки отбора золы гидроудаления с отвала ТЭЦ-5
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Ash extraction points from the ash dump of TPP-5
Source: compiled by the authors.

¹ Явинский А. В., Чулкова И. Л., Кацарский Р. С. Исследование водонепроницаемости и морозостойкости тяжелого бетона с золой гидроудаления для дорожного покрытия // Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. 2022. С. 514–517.

Таблица 1
Химический состав золы гидроудаления
Источник: составлено авторами.

Table 1
Chemical composition of pond ash
Source: compiled by the authors.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП*
57,83	1,11	23,29	7,26	0,13	0,78	1,66	0,50	0,69	0,42	6,33

* ППП – потери при прокаливании.

Таблица 2
Кинетика набора прочности образцов
Источник: составлено авторами.

Table 2
Kinetics of specimen strength gain
Source: compiled by the authors.

№ состава	Золо-цементное отношение, %	S _{уд} золы гидроудаления, м ² /кг	Водовязущее отношение %	Прочность на сжатие R _{сж} , МПа							
				Время твердения образцов, сут							После ТВО
				1	3	7	14	21	28	90	
1	0:100	-	29	4,00	12,54	23,25	30,58	39,01	43,22	54,33	35,46
2	20:80	220–250	32	3,08	9,84	20,04	27,06	34,05	37,12	59,23	33,85
3	20:80	340–370	32	3,60	11,04	21,06	28,10	35,92	39,80	61,37	35,07
4	20:80	460–490	32	3,78	12,22	23,12	29,82	37,32	42,57	65,41	36,35
5	20:80	650–700	32	3,17	9,97	20,50	27,15	34,41	38,10	62,11	33,43

В составах 2, 3, 4 применялась зола гидроудаления в естественном состоянии с различных точек отвала. Для достижения удельной поверхности 650–700 м²/кг зола гидроудаления подвергалась помолу в мельнице. Помол золы гидроудаления проводился в планетарной мельнице. Зола гидроудаления подвигалась помолу в высушенном состоянии.

Химический состав определялся с помощью рентгенофлуоресцентного метода и представлен в таблице 1.

По химическому составу золы гидроудаления можно сделать вывод, что она не обладает собственной активностью и является ультракислой (модуль основности <1). Модуль основности M_о -представляет отношение сумм основных оксидов к кислотным оксидам:

$$M_o = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (1)$$

Потери при прокаливании составили более 6%, что может быть следствием спекания угольного топлива, из-за чего в золе может находиться много крупных частиц несгоревшего топлива, что может негативно сказаться на ранних сроках твердения. Также негативное

влияние может оказывать неоднородность золы гидроудаления [19].

Для изготовления тяжелого бетона использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, который был исследован в лаборатории СибАДИ и показал соответствие всем требованиям ГОСТ 31108–2020. Удельная поверхность цемента определялась на приборе ПСХ-12 и составила 310 м²/кг.

Из смешанного вяжущего изготавливались образцы – кубики с ребром 2 см, которые твердели в камере нормального твердения (при температуре 20 °С ± 2). Часть образцов подверглась тепловлажностной обработке (ТВО) в пропарочной камере. Режим ТВО составил 4 ч, подъем температуры – 6 ч, изотермической выдержки при температуре 60 °С и 4 ч плавного остывания. Для пропаривания образцов использовалась камера нормального твердения. Режим тепловлажностной обработки изделий выбирался исходя из ГОСТ 33148–2014, так как запроектированные составы планируется использовать при производстве дорожных плит.

Прочность при сжатии образцов определяли на универсальной испытательной машине серии UGT-AI-7000LA в возрасте 1,3, 7, 14, 21, 28 сут. У образцов, прошедших ТВО, прочность определялась после их изъятия из пропарочной камеры через сутки после остывания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 2 представлены результаты исследования на прочность при сжатии образцов кубиков в нормальных условиях твердения, а также после ТВО.

Проанализировав результаты, представленные в таблице № 2, можно сделать следующие выводы. В первые сутки образцы с золой гидроудаления характеризуются снижением прочности по сравнению с контрольным беззольным образцом. Наиболее заметен данный эффект при удельной поверхности золы 220–250 м²/кг (образец № 2), снижение прочности составляет 23%. Это может быть следствием микропористости золы и наличия в ней агрегированных частиц, которые не позволяют полноценно прогидратировать портландцементу. Поскольку зола гидроудаления использовалась в состоянии естественной влажности, то часть воды осталась в её микропорах, не прореагировав с портландцементом.

У образцов № 2 наблюдается наибольшее снижение прочности по сравнению с контрольным беззольным образцом в любом возрасте, что является следствием повышенной водопотребности смешанного вяжущего вследствие пористой структуры золы гидроудаления. Стоит заметить, что скорость набора прочности у данного образца меньше, чем у остальных образцов с золой гидроудаления при любом сроке твердения. Так, в возрасте 28 сут прочность образца на 15% меньше, чем у контрольного образца. Из чего можно сделать вывод, что применение золы с удельной поверхностью 220–250 м²/кг при нормальных условиях твердения не является рациональным.

Образец № 3, в котором использовалась зола гидроудаления с удельной поверхностью 340–370 м²/кг, показывает результаты на прочность при сжатии лучше, чем образца № 2, хотя и уступает контрольному образцу. Так, у образца № 3 прочность в 1 сут твердения значительно выше, чем у образца № 2 (больше на 15%), но все еще ниже, чем у контрольного образца (ниже на 10%). Однако к более поздним срокам твердения прочность образцов № 3 соизмерима с образцами № 2. Например, в возрасте 7 сут у образца № 3 прочность при сжатии выше, чем у образца № 2 всего на 5%. По сравнению с контрольным образцом № 1 у образца № 3 заметно снижение прочности

на ~10% на всех этапах твердения. Снижение прочности также может быть негативным эффектом золы гидроудаления вследствие наличия в ней частиц несгоревшего топлива, хотя и меньшем, чем в образце № 2.

По показателям образцов № 4 можно сказать, что применение золы гидроудаления в составе смешанного вяжущего с удельной поверхностью 460–490 м²/кг является наиболее рациональным, поскольку образцы № 4 имеют значения прочности лучше, чем у остальных зольных образцов в любом возрасте. Так, в возрасте 3 сут образец № 4 имеет прочность всего на 3% ниже, чем у контрольного образца. Повышение прочности у образца № 4 при сравнении с другими образцами смешанного вяжущего может быть следствием микронаполняющего эффекта золы гидроудаления. Также, поскольку при повышении удельной поверхности золы гидроудаления в ней наблюдается повышение содержания гладких частиц шарообразной формы, может наблюдаться «шарикоподшипниковый эффект»², вследствие чего улучшается скольжение частиц цемента по поверхности зольных частиц.

Образец № 5, в котором использовалась молотая зола гидроудаления с удельной поверхностью 650–700 м²/кг показал значения по прочности ниже, чем образцы № 3 и № 4, а также значительно ниже контрольного образца. Прочность образцов № 5 в возрасте 1 и 3 сут ниже, чем у контрольного образца на 21 и 20% соответственно. Повышение удельной поверхности золы гидроудаления до значений 650–700 м²/кг вызывает слипание частиц при помоле вследствие воздействия на них поверхностных сил.

Поскольку удельная поверхность золы значительно выше, чем у цемента, частицы золы агрегируются на частицах цемента и препятствуют ему полноценно вступить в реакцию с водой.

После 90 сут твердения все составы с золой гидроудаления показывают прочность выше, чем контрольный беззольный состав. Например, состав № 4 показывает прочность на 17% выше, чем контрольный беззольный образец. Состав № 2, который на 28 сут показывал наименьшую прочность из испытываемых образцов, имеет прочность на 9% выше, чем состав № 1. Повышение прочности образцов, содержащих золу гидроудаления, является следствием пуццоланового эффекта золы.

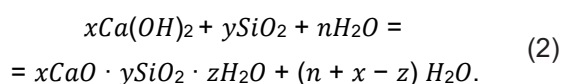
² Безродных А. А., Строкова В. В. Теоретическое обоснование использования модифицированных вяжущих для укрепления грунтов // V Международный студенческий строительный форум–2020. 2020. 126–131.

Снизить негативное влияние золы гидроудаления на набор прочности смешанного вяжущего можно использованием пластифицирующих добавок, что будет в дальнейшем изучаться.

Важно заметить, что зола гидроудаления не обладает собственными вяжущими свойствами, но при взаимодействии с цементом она вступает в пуццолановую реакцию, результатом которой становится образование гидросиликатов кальция. Гидросиликаты кальция характеризуются повышенной прочностью и нерастворимостью, что положительно сказывается на прочности всех образцов с золой гидроудаления. Однако на начальных этапах твердения вяжущего данный эффект незначителен, проявляется при более поздних сроках твердения [20,21,22]. Ускорить протекание пуццолановой реакции можно с помощью ТВО [23].

Термоактивация пуццолановой реакции способна повысить прочность образцов с золой по сравнению с контрольным беззолным образцом. Так, образцы № 2 и № 3 после прохождения ТВО не уступают по прочности контрольному беззолному образцу, а также их прочность удовлетворяет требованиям ГОСТа (прочность после ТВО > 70% марочной прочности). У образца № 4 наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом.

Повышение прочности золных образцов после ТВО относительно контрольного образца по сравнению с образцами, твердевшими в камере нормального твердения, позволяет сделать вывод, что термоактивация пуццолановой реакции золы гидроудаления позволяет добиться прироста прочности образцов. В ходе пуццолановой реакции аморфный кремнезем, содержащийся в золе гидроудаления, взаимодействует с гидроксидом кальция, что приводит к образованию гидросиликатов кальция:



Данные новообразования благоприятно влияют на качество вяжущего, так как они повышают прочность и уменьшают пористость. Образование гидросиликатов кальция благоприятно влияет на долговечность золоцементных изделий [24, 25].

По результатам испытаний образцов, твердеющих в нормальных условиях и подвергшихся ТВО, можно сделать вывод, что помол золы гидроудаления до удельной поверхности

более 490 м²/кг является нецелесообразным, так как при повышении удельной поверхности наблюдается снижение прочности смешанного вяжущего. В составе смешанного вяжущего рекомендуется применять золу гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг, так как образцы с ней показали наибольшую прочность по сравнению с остальными.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение испытаний смешанного вяжущего с заменой 20% цемента на ультракислую золу гидроудаления позволило установить влияние удельной поверхности золы гидроудаления на кинетику набора прочности. Установлено, что применение золы гидроудаления с удельной поверхностью 220–250 м²/кг и 650–700 м²/кг негативно влияет на ранний набор прочности смешанного вяжущего (в 1 и 3 сут). Установлено, что образцы, в которых применялась зола гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370, 650–700 м²/кг не достигают прочности контрольного беззолного образца в возрасте 28 сут.

Установлено, что рациональным является использование золы гидроудаления с удельной поверхностью 460–490 м²/кг. Образец с данной удельной поверхностью золы гидроудаления продемонстрировал показатели по прочности, наиболее близкие к контрольному беззолному образцу в любые сроки твердения, а также соответствует марочной прочности в возрасте 28 сут.

Подтверждено, что ТВО оказывает благоприятное влияние на прочность при сжатии смешанного вяжущего с золой гидроудаления. Образцы с использованием золы гидроудаления с удельной поверхностью 220–250, 340–370 м²/кг показали прочность, незначительно уступающую контрольному беззолному образцу. У образца с использованием золы гидроудаления 460–490 м²/кг после ТВО наблюдается повышение прочности на 12% по сравнению с контрольным образцом. Повышение прочности образцов из смешанного вяжущего связано с ускорением в них прохождения пуццолановой реакции, продукты которой положительно влияют на прочность получаемых изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федюк Р. С., Смоляков А. К., Тимохин Р. А. Применение золошлаковых отходов в строительстве как фактор улучшения экологической обстановки // Экологический сборник 6: труды молодых ученых Поволжья. 2017. С. 391–395.

2. Yadav S., Pandey V. C., Singh L. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities // *Land Degradation & Development*. 2021. T. 32. № 16. С. 4453–4471.
3. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete // *SN Applied Sciences*. 2020. T. 2. № 6. – pp. 1-9.
4. Насруллоев Ф. Х., Кобулиев З. В., Тагоев С. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов душанбинской ТЭЦ-2 // *Химия и инженерная экология-XX*. 2020. С. 128–131.
5. Sowjanya S., Adishesu S. Statistical analysis of the physical properties of ternary blended concrete // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022. T. 7. № 1. pp. 1-9.
6. Divitkumar R. P. et al. Rheology of Sustainable Self Compacting Concrete with Triple Blend Cementitious Materials // *International Conference on Structural Engineering and Construction Management*. Springer, Cham, 2021. p. 905-919.
7. Khan R. A., Ganesh A. The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete // *Journal of building materials and structures*. 2016. T. 3. № 1. – p. 31
8. Баженов Ю. М. Эффективные бетоны для строительных и восстановительных работ с использованием бетонного лома и отвальных зол ТЭС / Ю. М. Баженов, С. А. Ю. Муртазаев // *Вестник МГСУ*. 2008. № 3. С. 124–127.
9. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Ковалева И. А. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья // *Вестник МГСУ*. Москва. 2015. № 11. С. 101–109.
10. Федюк Р. С., Мочалов А. В., Пезин Д. Н., Тимохин Р. А. Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства // *Вестник СибАДИ*. 2018. Т. 15, № 2 (60). С. 294–304.
11. Шейнин А. М., Эккель С. В. Причина долговечности // *Строительная техника и технологии*. 2004. №1(29). С. 62–65
12. Салимова Б. Д., Худайкулов Р. М. Цементобетонные смеси в строительстве автомобильных дорог // *Вестник науки и образования*. 2020. №. 3-3 (81). С. 9–11.
13. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete // *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019. T. 7. №. 3. p. 12-20.
14. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 270. С. 121857.
15. Yousuf A. et al. Fly ash: production and utilization in India-an overview // *J Mater Environ Sci*. 2020. T. 11. № 6. pp. 911-921.
16. Jose A. et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 263. pp. 120136.
17. Lal D., Chatterjee A., Dwivedi A. Investigation of properties of cement mortar incorporating pond ash—an environmental sustainable material // *Construction and Building Materials*. 2019. T. 209. pp. 20-31.
18. Lee J. S. et al. A Study on the Possibility of Using Cement Raw Material through Chemical Composition Analysis of Pond Ash // *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2020. T. 24. № 6. pp. 180-188.
19. Махмудов А. М., Трофимов Б. Я., Гафоров Ф. А. Влияние количества и дисперсности золы на формирование структуры и свойства цементного камня // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. Т. 21, № 4. С. 40–47.
20. Joshi R.C. Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization // *Indian Geotechnical Conference*. 2010. P. 16–18.
21. Коровкин М. О., Петухов А. В. Высокопрочные бетоны с высоким содержанием золы Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 1. С. 106–112.
22. Siddique R., Khan M. I. Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media, 2011.
23. Zhang Y., Sun Q., Yang X. Changes in color and thermal properties of fly ash cement mortar after heat treatment // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 165. С. 72-81.
24. Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 3. С. 16–24
25. Murtazaiev S. A.Y., Saidumov M. S., Lesovik V. S., Chernysheva N. V., Bataiev D. K. S. Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration for carbonation // *Modern Applied Science*. 2015. T. 9. № 4. pp. 233–245.

REFERENCES

1. Fedyuk R. S., Smolyakov A. K., Timohin R. A. Primenenie zoloshlakovykh othodov v stroitel'stve kak faktor uluchsheniya ekologicheskoy obstanovki [Application of ash and slag waste in construction as a factor in improving the environmental situation]. *Jekologicheskij sbornik 6: trudy molodykh uchenyh Povolzh'ja*. 2017: 391-395. (In Russ.)
2. Yadav S., Pandey V. C., Singh L. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities. *Land Degradation & Development*. 2021. Vol. 32. No 16: 4453-4471.
3. Raheel M., Rahman F., Ali Q. A stoichiometric approach to find optimum amount of fly ash needed in cement concrete. *SN Applied Sciences*. 2020; Vol. 2. No 6: 1-9.
4. Nasrulloev F. Kh., Kobuliev Z. V., Tagoev S. A. Kompleksnaya pererabotka zoloshlakovykh othodov dushanbinskoj TEC-2 [Complete reproduction of ashloox wastes from dushanbin CHPP-2]. *Himija i inzhenernaja jekologija-XX*. 2020: 128-131. (In Russ.)
5. Sowjanya S., Adishesu S. Statistical analysis of the physical properties of ternary blended concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022; Vol. 7. No 1: 1-9.
6. Divitkumar R. P. et al. Rheology of Sustainable Self Compacting Concrete with Triple Blend Cementitious Materials. *International Conference on Structural Engineering and Construction Management*. Springer, Cham, 2021: 905-919.

7. Khan R. A., Ganesh A. The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete. *Journal of building materials and structures*. 2016; Vol. 3. No 1: 31
8. Bazhenov Yu. M. Effektivnye betony dlya stroitel'nyh i vosstanovitel'nyh rabot s ispol'zovaniem betonogo loma i otval'nyh zol TES [Effective concretes for construction and restoration works using concrete scrap and waste ash from TPPs]. *Vestnik MGSU*. 2008;3: 124-127. (In Russ.)
9. Tolstoy A. D., Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. H., Kovaleva I. A. Poroshkovye betony s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [Powder concretes using man-made raw materials]. *Vestnik MGSU*. Moscow, 2015; 11: 101-109. (In Russ.)
10. Fediuk R.S., Mochalov A.V., Pezin D.N., Timokhin R.A. Self-compacting concrete with the use of plant waste. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(2):294-304. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-294-304>
11. Sheynin A. M., Eckel S. V. Prichina dolgovechnosti [Reason of durability]. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*. 2004;1(29): 62-65. (In Russ.)
12. Salimova B. D., Khudaykulov R. M. Cementobetonnye smesi v stroitel'stve avtomobil'nyh dorog [Cement concrete mixtures in the construction of roads]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020; 3-3 (81): 9-11. (In Russ.)
13. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019; T. 7. №. 3: 12-20.
14. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*. 2021; T. 270: 121857.
15. Yousuf A. et al. Fly ash: production and utilization in India-an overview. *J Mater Environ Sci*. 2020; T. 11. no. 6: 911-921.
16. Jose A. et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. *Construction and Building Materials*. 2020; T. 263: 120136.
17. Lal D., Chatterjee A., Dwivedi A. Investigation of properties of cement mortar incorporating pond ash—an environmental sustainable material. *Construction and Building Materials*. 2019; T. 209: 20-31.
18. Lee J. S. et al. A Study on the Possibility of Using Cement Raw Material through Chemical Composition Analysis of Pond Ash //Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. 2020; T. 24. no 6: 180-188.
19. Makhmudov A. M., Trofimov B. Y., Gafarov F. A. Vliyanie kolichestva i dispersnosti zoly na formirovaniye struktury i svoystva cementnogo kamnya [The influence of the amount and dispersion of ash on the formation of the structure and properties of cement stone]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2021; Vol. 21. No 4: 40-47. (In Russ.)
20. Joshi, R.C. Fly Ash – Production, Variability and Possible Complete Utilization. *Indian Geotechnical Conference*. 2010: 16–18.
21. Korovkin M. O., Petukhov A. V. Vysokoprochnyye betony s vysokim soderzhaniiem zoly Kansk-Achinskogo burougol'nogo bassejna [High-strength concretes with high ash content of Kansk-Achinsk brown coal basin]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2017; No 1 :106-112. (In Russ.)
22. Siddique R., Khan M. I. Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media, 2011.
23. Zhang Y., Sun Q., Yang X. Changes in color and thermal properties of fly ash cement mortar after heat treatment. *Construction and Building Materials*. 2018; Vol. 165: 72-81.
24. Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vliyanie zoly gidroudaleniya na svoystva tjazhelogo betona dlja stroitel'stva dorozhnogo pokrytiya [Influence of hydraulic removal ash on properties of heavy concrete for road pavement construction]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2022; 3: 16–24. (In Russ.)
25. Murtazaiev S. A. Y., Saidumov M. S., Lesovik V. S., Chernysheva N. V., Bataiev D. K. S. Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration for carbonation. *Modern Applied Science*. 2015; T. 9. no 4: 233–245.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Явинский А. В. Формулировка направления и темы исследования, проведение эксперимента, анализ состояния вопросов и результатов исследования, написание, редактирование и оформление статьи.

Чулкова И. Л. Консультации, формулировка направления и темы исследования, анализ состояния вопросов и результатов исследования, написание, редактирование и оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Aleksandr V. Yavinsky. Formulation of the direction and topic of the study, conducting the experiment, analysis of the status of the issues and results of the study, writing, editing and design of the article.

Irina L. Chulkova. Consultation, formulation of the direction and topic of the research, analysis of the status of the issues and research results, writing, editing and design of the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Явинский Александр Викторович – аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство», преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», SPIN-код: 4276-7420.

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 6949-2994.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander V. Yavinsky – Graduate student of the Industrial and Civil Engineering Department, teacher of the Technosphere and Environmental Safety Department, SPIN-код: 4276-7420.

Irina L. Chulkova – Dr. of Sci., Professor, Industrial and Civil Engineering Department, SPIN-код: 6949-2994.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисункной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисункные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

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.