

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 19, № 5. 2022
Vol.19, No. 5. 2022

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2

ТОМ 19, № 5. 2022

VOL. 19, No. 5. 2022

Сквозной номер выпуска – 87

Continuous issue – 87

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

Периодичность издания – 6 раз в год

Подписной индекс в каталоге

ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the 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)», 2022

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

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

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

05.22.01 – 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).

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 14.10.2022. Дата выхода в свет 14.10.2022. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

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)

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 14.10.2022. Publication date is 14.10.2022. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Жигadlo 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

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

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 техни. 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 AuthorID 6603741286, **ResearcherID** P-7880-2015,
ORCID ID 0000-0003-2164-9936

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

Коротаев 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. Разакова, 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

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

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

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

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

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

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

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

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ
СНЕЖНОЙ МАССЫ В РОТОРЕ СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ 610**

В. С. Сизиков, С. А. Сизиков

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИБРОУДАРНОЙ РЕШЕТКИ И СИТА ГРОХОТА
В РЕЖИМЕ СИНФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ 624**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

С. А. Аземша, В. М. Морозов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЯХ
АНАЛИЗОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРАНСПОРТНОГО ОПРОСА 638**

А. А. Гуськов, Н. Ю. Залукаева, М. А. Севостьянов

**МЕТОДИКА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ
ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА 654**

А. С. Денисов, Е. В. Феклин, А. В. Игнатов

**ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА
И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОБУСОВ 666**

С. В. Корнеев, С. В. Пашукевич, В. Д. Бакулина, Н. Г. Певнев

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИ ЗИМНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВТОМОБИЛЕЙ 680**

А. В. Куликов, Е. А. Близнякова, П. А. Павлов, А. А. Куликов

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ ПОСТАВКИ ЗЕРНА ИЗ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В ИРАН 692**

А. А. Юнг, А. Г. Шевцова

**РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА
С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ УЧАСТКА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ 716**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

В. С. Лесовик, Е. В. Фомина, И. А. Черепанова, А. Н. Ряпухин

**ВЫВЕТРЕННЫЕ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ
АНОМАЛИИ – СЫРЬЕ СТРОЙИНДУСТРИИ 728**

А. А. Лунёв, Р. С. Кацарский

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ В НАСЫПНОМ МАССИВЕ ИЗ ПЕСКА
С УЧЁТОМ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 738**

Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ 752**

А. В. Селиванов, Ф. Ф. Резер, И. А. Чакурин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНОГО
РАВНОВЕСИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ 762**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Denis S. Aleshkov, Pavel A. Korchagin, Irina A. Teterina

MATHEMATICAL MODEL OF THE SNOW MASS TRANSPORTATION PROCESS IN THE SNOWBLOWER ROTOR.....	611
--	------------

Valentin S. Sizikov, Stanislav A. Sizikov

INTERACTION OF VIBROIMPACT LATTICE AND SCREEN SIEVE IN ANTI-PHASE OSCILLATION MODE.....	625
--	------------

PART II. TRANSPORT

Sergei A. Azemsha, Vitaly M. Marozau

STUDY OF REGULARITIES IN TRANSPORT PREFERENCES BY ANALYSIS OF TRANSPORT SURVEY RESULTS	639
---	------------

Artem A. Guskov, Natalia Y. Zalukaeva, Maxim Al. Sevostyanov

METHODOLOGY FOR INFORMATION AND TECHNOLOGY ASSESSMENT OF PUBLIC PASSENGER TRANSPORT WORK	655
---	------------

Alexander S. Denisov, Evgeny V. Feklin, Anton V. Ignatov

INFLUENCE OF PRODUCTION SPECIALISATION LEVEL ON EFFICIENCY OF TECHNICAL SERVICE AND BUSES OPERATION SAFETY.....	667
--	------------

Sergey V. Korneev, Sophia V. Pashukevich, Vera D. Bakulina, Nikolay G. Pevnev

CONTAMINATION OF ENGINE OILS DURING WINTER VEHICLE OPERATION	681
---	------------

Alexey V. Kulikov, Elena A. Bliznyakova, Pavel A. Pavlov, Andrey A. Kulikov

IMPROVEMENT OF ORGANISATION FOR ROAD TRANSPORT FUNCTIONING IN A MULTIMODAL LOGISTICS SYSTEM FOR GRAIN DELIVERY FROM VOLGOGRAD REGION TO IRAN	693
---	------------

Anastasia A. Jung, Anastasia G. Shevtsova

RESULT OF AN EVALUATION FOR TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS CONSIDERING THE MOVEMENT OF PERSONAL MOBILITY DEVICES BY MODELLING A ROAD TRAFFIC SECTION	717
---	------------

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Valery S. Lesovik, Ekaterina V. Fomina, Irina A. Cherepanova, Alexander N. Ryapukhin

WEATHERED QUARTITE SANDSTONES OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY AS A RAW MATERIAL FOR CONSTRUCTION INDUSTRY.....	729
---	------------

Aleksandr A. Lunev, Roman S. Katsarsky

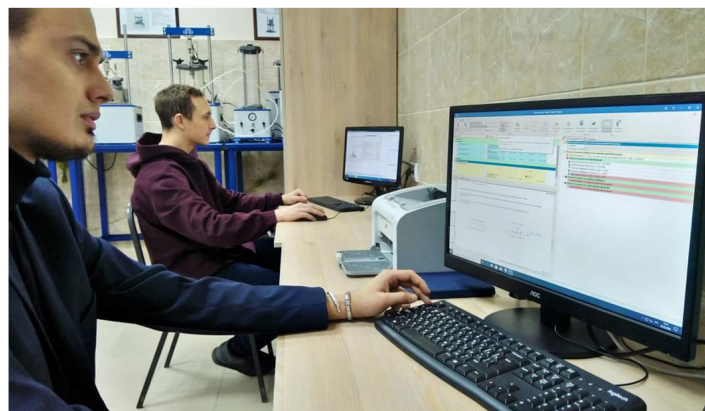
PREDICTION OF PRINCIPAL STRESSES FROM EXTERNAL LOAD IN A SAND MASS CONSIDERING ITS MECHANICAL CHARACTERISTICS	739
--	------------

Yury V. Pukhareenko, Dmitrii A. Panteleev, Mikhail I. Zhavoronkov

EVALUATION OF DISPERSION REINFORCEMENT IN CONCRETE IN TERMS OF STRENGTH AND CRACK RESISTANCE.....	753
--	------------

Anton V. Selivanov, Fedor F. Reger, Ivan A. Chakurin

STUDY OF CRACK FORMATION AND LIMIT EQUILIBRIUM OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB SHELL	763
---	------------



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



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

УДК 629.464.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623>

EDN: FYWWZY

Научная статья



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СНЕЖНОЙ МАССЫ В РОТОРЕ СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ

Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина**Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»,
г. Омск, Россия**denisaleshkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4204-7221>**korchagin_pa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8936-5679>**iateterina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-000-8012-8511>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Сложность и трудоемкость определения функциональных зависимостей между структурными элементами роторного снегоочистителя и разрабатываемым снежным массивом при проведении экспериментальных исследований на физической модели роторного снегоочистителя обуславливает необходимость разработки математических моделей, позволяющих максимально точно описывать процессы взаимодействия элементов роторного снегоочистителя со снежной массой.

Методы и материалы. Математическая модель процесса транспортирования снежной массы в роторе, в которой снег представлен как сыпучая среда, включающая в себя совокупность отдельных частиц, разработана с применением метода дискретных элементов. При построении математической модели были решены задачи идентификации массовых и поверхностных сил, действующих в системе «ротор – снежная масса». Обоснованы принцип расположения группы частиц в межлопастном пространстве ротора снегоочистителя и выбора метода анализа математической модели.

Результаты. Реализация на ЭВМ данной математической модели позволила получить численные значения сил нормальной реакции кожуха ротора в каждый момент времени, что позволяет разрабатывать новые и совершенствовать существующие конструктивные схемы, обоснованно осуществлять выбор конструктивных и технологических параметров ротора роторного снегоочистителя.

Обсуждение и заключение. Предложенная математическая модель и уравнения движения, составленные на ее основе, позволяют однозначно определить значения всех действующих сил на снежную массу в процессе ее транспортирования в роторе роторного снегоочистителя. Рассматриваемая модель позволяет моделировать снежную массу в межлопастном пространстве более сложной конфигурации и совокупности частиц, имеющих нерегулярное распределение по размерам и взаимному положению.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коммунальная машина, ротор снегоочистителя, роторный снегоочиститель, снежная масса, лопасть ротора, метательный аппарат, математическая модель, метод дискретных элементов.

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Математическая модель процесса транспортирования снежной массы в роторе снегоочистителя // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 610-623. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623>

© Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623>

EDN: FYWWZY

MATHEMATICAL MODEL OF THE SNOW MASS TRANSPORTATION PROCESS IN THE SNOWBLOWER ROTOR

Denis S. Aleshkov, Pavel A. Korchagin, Irina A. Teterina*

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

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

korchagin_pa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8936-5679>

iateterina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-000-8012-8511>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. The complexity and laboriousness of determining the functional dependencies between the structural elements of a rotary snowplow and the developed snow mass when conducting experimental studies on a physical model of a rotary snowplow necessitates the development of mathematical models that make it possible to describe as accurately as possible the processes of interaction between the elements of a rotary snowplow and snow mass.

The method of research. A mathematical model of the process of transporting snow mass in a rotor, in which snow is represented as a loose medium, including a set of individual particles, was developed using the method of discrete elements. When constructing a mathematical model, the problems of identifying mass and surface forces acting in the 'rotor - snow mass' system were solved. The principle of the location of a group of particles in the interblade space of the snowplow rotor and the choice of the method for analyzing the mathematical model are substantiated.

Results. The implementation of this mathematical model on a computer made it possible to obtain the numerical values of the forces of the normal reaction of the rotor casing at each moment of time, which allows developing new and improving existing design schemes, reasonably choosing the design and technological parameters of the rotor of a snow blower.

Discussion and conclusion. The proposed mathematical model and the equations of motion, compiled on its basis, make it possible to unambiguously determine the values of all forces acting on the snow mass during its transportation in the rotor of a rotary snowplow. The model under consideration makes it possible to simulate a snow mass in the interblade space of a more complex configuration and a set of particles that have an irregular distribution in size and relative position.

KEYWORDS: utility vehicle, snowplow rotor, snowplow rotor, snow mass, rotor blade, propelling apparatus, mathematical model, discrete element method.

The article was submitted 25.07.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Denis S. Aleshkov, Pavel A. Korchagin, Irina A. Teterina Mathematical model of the snow mass transportation process in the snowblower rotor. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 610-623. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623>

© Aleshkov D. S., Korchagin P. A., Teterina I. A., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при математическом моделировании работы ротора роторного снегоочистителя общепринятым является представление снега как материальной частицы [1, 2, 3]. Однако такое представление не в полной мере отражает реальные свойства и поведение снежной массы. Существуют подходы, в которых снежная масса в межлопастном пространстве представлена как отдельное крупнокусковое образование [4]. В рамках этой теории дается сравнительный анализ двух крайних схем рассмотрения снега с точки зрения представления его формы в роторе метательного аппарата. Ключевым аспектом таких моделей является определение кинематических параметров снежной массы в момент ее схода с лопасти ротора [4]. Дальнейшее исследование процесса разгрузки ротора снегоочистителя получило развитие в работе [5], в которой при построении математических моделей работы ротора метательного аппарата момент транспортирования снежной массы принимались допущения, что снежная масса на лопасти ротора представляется как совокупность сфер конечного размера, а процесс разгрузки осуществляется последовательно. Данный подход позволил сформулировать ряд новых конструктивных решений профиля кожуха ротора [5].

Основным недостатком предыдущих исследований отмечено то, что в них не рассматривается взаимное влияние частиц снега на процесс их транспортирования и схода с лопасти ротора. Учет взаимного влияния частиц неизбежно приводит к усложнению математической модели работы ротора в части представления снежной массы.

В настоящее время сформировалось несколько основных направлений представления снежной массы в различного рода математических моделях.

В ряде научных работ снег рассматривается как сплошная среда с определенной комбинацией реологических характеристик¹ [6, 7]. Решение таких моделей осуществляется на ЭВМ методом конечных элементов [8]. Однако в межлопастном пространстве ротора

непрерывно наблюдается массообмен транспортируемого материала. При моделировании процесса непрерывного массообмена невозможно использовать существующие алгоритмы метода конечных элементов, так как они не позволяют корректно представить поведение частиц снежной массы. Несколько интересных подходов к представлению снега описаны в работах² [9, 10, 11], однако они не получили широкого распространения.

Альтернативным направлением описания динамики процесса движения снежной массы является использование метода дискретных элементов (DEM). В основе данного метода лежит решение системы уравнений, записанных на основании второго закона Ньютона для каждой отдельно взятой твердой частицы³ [12, 13, 14].

Результаты предыдущих исследований работы ротора снегоочистителя не рассматривают процесс взаимодействия снежной массы и элементов метательного аппарата до момента разгрузки лопасти ротора.

Основной целью данной работы является разработка математической модели, основанной на DEM подходах, к процессу транспортирования снежной массы в роторе, в которой снег представлен как сыпучая среда, включающая в себя совокупность отдельных частиц. При построении математической модели были решены задачи идентификации массовых и поверхностных сил, действующих в системе «ротор – снежная масса», обоснования расположения группы частиц в межлопастном пространстве ротора снегоочистителя. Кроме этого, представлен метод анализа математической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование процесса транспортирования снежной массы рассмотрено в прямоугольной системе координат, центр которой совпадает с центром вращения ротора метательного аппарата. Ось $O_p Z_p$ направлена вверх, ось $O_p Y_p$ направлена вправо, параллельно основанию (рисунок 1). Значение углового положения лопасти ротора снегоочистителя определяется углом, φ .

¹ Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1994. 432 с.

² Шалман Д. А. Снегоочистители. Ленинград: Машиностроение. 1973. 216 с. Текст: непосредственный.

³ Иванов А. Н., Мишин В. А. Снегоочистители отбрасывающего действия. М.: Машиностроение, 1981. 159 с. Текст: непосредственный.

Для составления математической модели были приняты следующие допущения:

- снежная масса на лопасти ротора снегоочистителя представляет собой совокупность сфер различного радиуса;
- сферы в процессе транспортирования не деформируются (абсолютно жесткие);
- транспортирование снежного массива рассматривается в плоскости;
- вращение сфер отсутствует;
- ротор совершает равномерное вращение.

Одним из ключевых аспектов представления снежной массы как совокупности сфер конечного размера является компоновочная схема, определяющая последовательность расположения и размеры сфер, образующих некоторое множество. В данной работе использовался подход, описанный в работах¹ [4, 15], суть которого заключается в принятии дополнительных допущений, что снежная масса в межлопастном пространстве представляет собой набор сфер, N_i , где $i=1, 2, \dots, n$, вписанных в равнобедренную трапецию (см. рисунок 1).

Образующаяся в данном случае расчетная сетка является регулярной. Угловое положение лопасти ротора определяется углом φ_0 , отсчитываемым от горизонтальной оси $O_p Y_p$, в направлении по часовой стрелке.

С учетом принятых допущений возможны следующие варианты положения частицы в рассматриваемой массе (см. рисунок 1):

- внутри массива (N1);
- на лопасти ротора (N2);
- на кожухе ротора метательного аппарата (N3);
- на верхней свободной поверхности (N4);
- на внутренней свободной поверхности (N5);
- в 4 углах снежной призмы (N6).

Для плоской расчетной схемы регулярного массива возможны 9 групп коэффициентов, зависящих от положения частицы в массе.

Таким образом, заданное положение частицы определяет вид и количество коэффициентов в уравнениях движения.

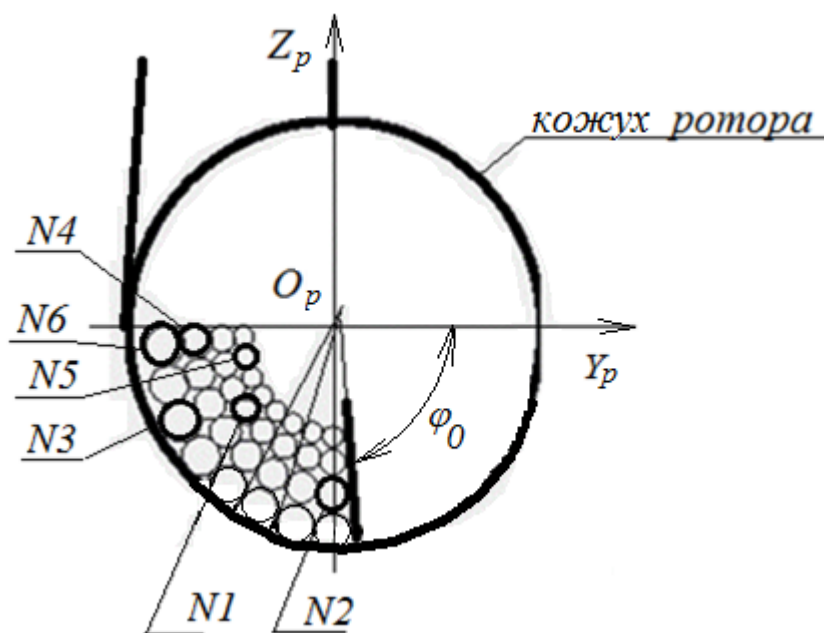


Рисунок 1 – Схема представления снежной массы в межлопастном пространстве ротора метательного аппарата
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme of representation of the snow mass in the interblade propellant rotor space
Source: compiled by the authors.

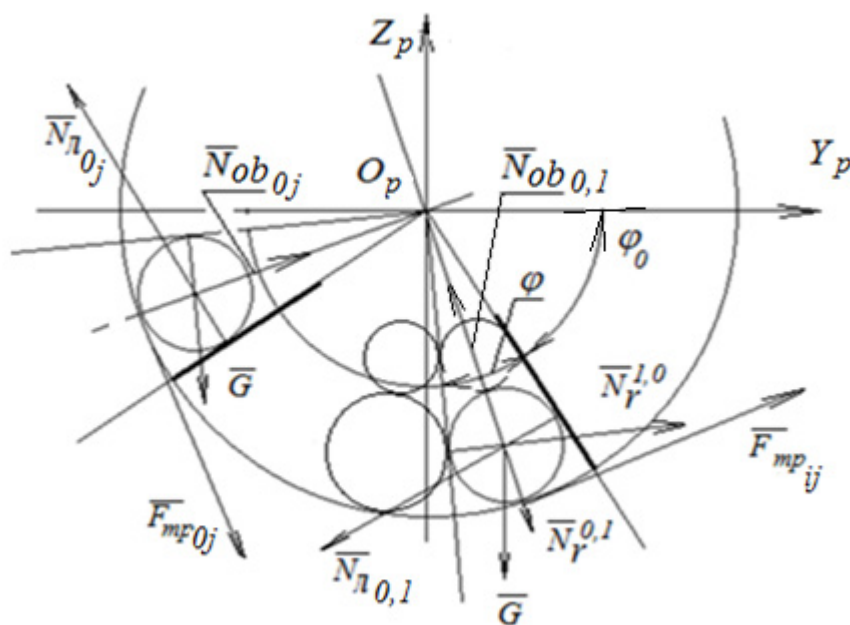


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на снежную частицу
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of forces acting on a snow particle
Source: compiled by the authors.

В общем виде на i -ю снежную частицу действуют следующие силы (рисунок 2):

- сила тяжести (G_i);
- сила трения i -й снежной частицы о кожух ротора (F_{mpi});
- сила нормальной реакции кожуха ротора снегоочистителя (N_{obi});
- сила нормальной реакции лопасти ротора (N_{li});
- сила нормальной реакции соседних частиц (N_{ri}), где i – номер ряда; j – номер частицы в ряду.

С учетом допущения о регулярности расчетной сетки на каждую частицу действуют максимум 7 сил, две из которых являются массовыми, остальные 5 – поверхностными.

Уравнения действующих сил на частицы в межлопастном пространстве ротора метательного аппарата включают в себя группы слагаемых, вид которых определяется положением частицы в массиве. В принятой системе координат в общем виде уравнения движения для произвольной частицы, имеют вид

$$m_{i,j}(\vec{a}^n + \vec{a}^r) = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (1)$$

где $\vec{a}^n$ – центростремительное ускорение; $\vec{a}^r$ – касательное ускорение, согласно принятому допущению, $a^r = 0$; F_i – силы, действующие на i -ю частицу.

Проекции вектора центростремительного ускорения на оси принятой системы координат, с учетом того, что ось вращения ротора также является мгновенным центром ускорений, примут вид

$$\begin{cases} -m_{i,j}\omega^2 y_{i,j} = \sum_{i=1}^n F_i^y \\ m_{i,j}\omega^2 z_{i,j} = \sum_{i=1}^n F_i^z \end{cases}, \quad (2)$$

где верхний индекс означает проекцию сил на оси $O_p Y_p$ и $O_p Z_p$ соответственно.

Тогда основное уравнение динамики можно записать:

$$\begin{cases} -m_{i,j}\omega^2 y_{i,j} = F_{mp_{i,j}}^y - N_{obj}^y - N_{lij}^y + N_{rij}^y \\ m_{i,j}\omega^2 z_{i,j} = -G_{ij} + F_{mp_{i,j}}^z + N_{obj}^z - N_{lij}^z + N_{rij}^z \end{cases} \quad (3)$$

Систему уравнений (3) можно представить в виде:

$$\begin{cases} 0 = m_{i,j}\omega^2 y_{i,j} + F_{mp_{i,j}}^y - N_{obj}^y - N_{lij}^y + N_{rij}^y \\ 0 = -G - m_{i,j}\omega^2 z_{i,j} + F_{mp_{i,j}}^z + N_{obj}^z - N_{lij}^z + N_{rij}^z \end{cases} \quad (4)$$

Для однозначного определения слагаемых в системе уравнений (4) необходимо найти проекции действующих сил на частицу в принятой системе координат.

На рисунке 3 представлены проекции центробежной силы на оси принятой системы координат.

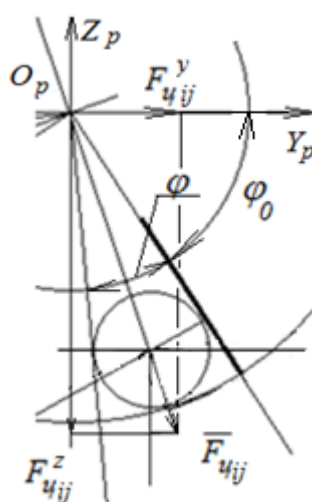


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения центробежной силы
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Calculation scheme for determining the centrifugal force
Source: compiled by the authors.

Соответственно, проекции центробежной силы будут равны:

$$F_{yij}^y = F_{yij} \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) = F_{yij} \cos\frac{\varphi}{2} \cos\varphi_0 - F_{yij} \sin\frac{\varphi}{2} \sin\varphi_0, \quad (5)$$

$$F_{yij}^z = -F_{yij} \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) = -F_{yij} \sin\frac{\varphi}{2} \cos\varphi_0 - F_{yij} \cos\frac{\varphi}{2} \sin\varphi_0. \quad (6)$$

Направление действия силы нормальной реакции кожуха ротора (N_{obj}) совпадает с направлением действия центробежной силы, но противоположно по направлению (рисунок 4).

Соответственно, проекции сил нормальной реакции и силы трения от этой реакции:

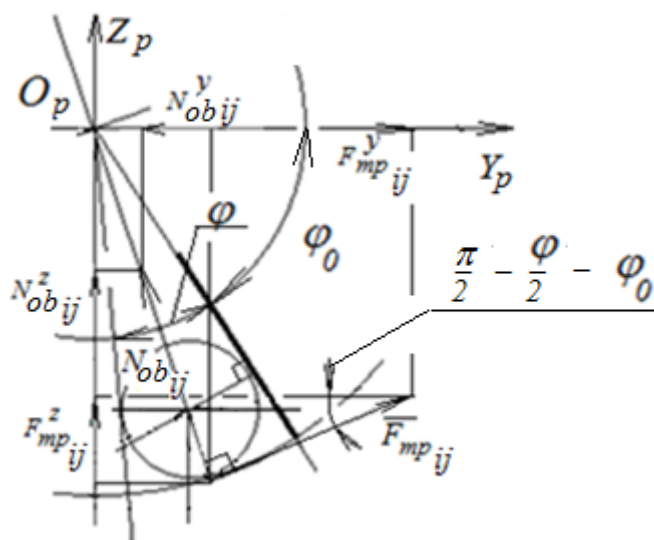


Рисунок 4 – Расчетная схема определения проекций силы нормальной реакции (N_{obj}) кожуха ротора и силы трения (F_{mpl}) снежной частицы о кожух ротора
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Calculation scheme for determining projections of the normal reaction force (N_{obj}) of the rotor casing and the friction force (F_{mpl}) of the snow particle on the rotor casing
Source: compiled by the authors.

$$F_{mpl,j}^y - N_{obj}^y = N_{obj} \left(-\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + f \left(\sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 \right) \right); \quad (7)$$

$$F_{mpl,j}^z + N_{obj}^z = N_{obj} \left(\cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + f \left(\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 \right) \right), \quad (8)$$

где f – коэффициент трения снега по металлу.

Направление действия силы нормальной реакции (N_{lij}) лопасти ротора перпендикулярно плоскости лопасти (рисунок 5). Проекция силы нормальной реакции будут равны

$$N_{lij}^y = N_{lij} \sin \varphi_0; \quad (9)$$

$$N_{lij}^z = N_{lij} \cos \varphi_0, \quad (10)$$

Проекция сил нормальных реакций (N_{rij}) от соседних частиц на оси принятой системы координат, согласно расчетным схемам, изображенным на рисунках 6 и 7, определяются по формулам:

$$N_{r0,1}^y = N_{r0,1} \cos(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{0,1}}{y_{0,0} - y_{0,1}})); \quad (11)$$

$$N_{r0,1}^z = N_{r0,1} \sin(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{0,1}}{y_{0,0} - y_{0,1}})); \quad (12)$$

$$N_{r1,0}^y = N_{r1,0} \cos(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{1,0}}{y_{0,0} - y_{1,0}})); \quad (13)$$

$$N_{r1,0}^z = N_{r1,0} \sin(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{1,0}}{y_{0,0} - y_{1,0}})). \quad (14)$$

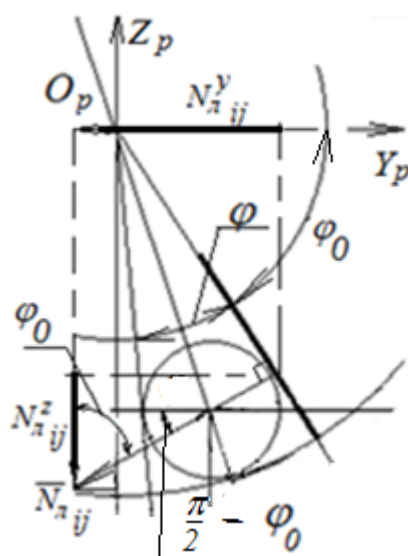


Рисунок 5 – Расчетная схема определения проекций силы нормальной реакции (N_{ij}) лопасти ротора метательного аппарата на оси $O_p Y_p$ и $O_p Z_p$ принятой системы координат
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Calculation scheme for determining force projections normal reaction (N_{ij}) propellant rotor blades on the axis $O_p Y_p$ and $O_p Z_p$ of the accepted coordinate system
Source: compiled by the authors.

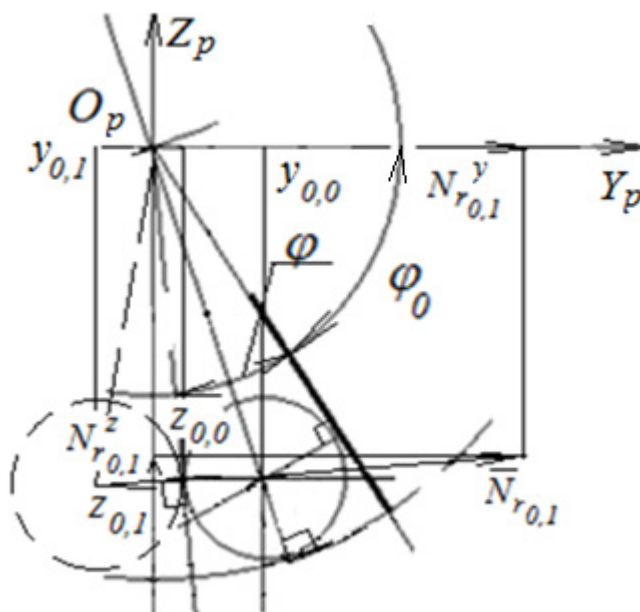


Рисунок 6 – Схема для определения силы нормальной реакции частиц в одном слое
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Scheme for determining the force normal reaction of particles in one layer
Source: compiled by the authors.

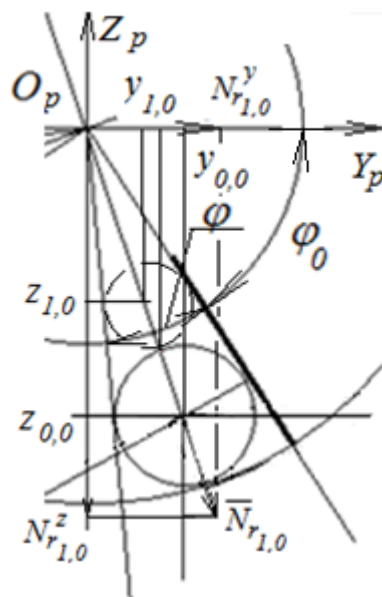


Рисунок 7 – Схема для определения проекций силы нормальной реакции от частиц соседних слоев
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Scheme for determining force projections normal reaction from particles of neighboring layers
Source: compiled by the authors.

После подстановки выражений действующих сил (5...14) в систему уравнений (4) получены уравнения равновесия для каждой из характерных частиц (N_i):

- для частиц внутри снежной массы ($N1$):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) + \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) , \\ 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) - \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) - g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \end{aligned} \right. , \quad (15)$$

- на лопасти ротора ($N2$):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) + l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) - N_{nij} \sin \varphi_0 \\ 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) - g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) - N_{nij} \cos \varphi_0 \end{aligned} \right. , \quad (16)$$

- на кожухе ротора (N3):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri,0}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{i,0}}{y_{0,i} - y_{i,0}})) + \frac{N_{r0,i+1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{0,i+1}}{y_{0,i} - y_{0,i+1}})) + \frac{N_{r0,i-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{0,i-1}}{y_{0,i} - y_{0,i-1}})) + \\ &+ l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{obj}}{m_{ci}} (-\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + f(\sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) \\ 0 &= \frac{N_{ri,0}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{i,0}}{y_{0,i} - y_{i,0}})) + \frac{N_{r0,i+1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{0,i+1}}{y_{0,i} - y_{0,i+1}})) + \frac{N_{r0,i-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,i} - z_{0,i-1}}{y_{0,i} - y_{0,i-1}})) - \\ &- g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{obj}}{m_{ci}} (\cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + f(\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) \end{aligned} \right. , \quad (17)$$

- на верхней свободной поверхности (N4):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) + \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + \\ &+ \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \\ 0 &= \frac{N_{ri,j+1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j+1}}{y_{i,j} - y_{i,j+1}})) + \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + \\ &+ \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) - g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \end{aligned} \right. , \quad (18)$$

- на внутренней свободной поверхности (N5):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \\ 0 &= \frac{N_{ri+1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i+1,j}}{y_{i,j} - y_{i+1,j}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + \\ &+ \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) - g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \end{aligned} \right. , \quad (19)$$

- в 4 углах снежной призмы (N6):

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{r1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,j} - z_{1,j}}{y_{0,j} - y_{1,j}})) + \frac{N_{r0,j-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,j} - z_{1,j-1}}{y_{0,j} - y_{1,j-1}})) + \\ &+ l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{objj}}{m_{ci}} (-\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + f(\sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) \\ 0 &= \frac{N_{r1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,j} - z_{1,j}}{y_{0,j} - y_{1,j}})) + \frac{N_{r0,j-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,j} - z_{1,j-1}}{y_{0,j} - y_{1,j-1}})) - \\ &- g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{objj}}{m_{ci}} (\cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + f(\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) \end{aligned} \right. , \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{r1,0}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{1,0}}{y_{0,0} - y_{1,0}})) + \frac{N_{r0,1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{0,1}}{y_{0,0} - y_{0,1}})) - N_{x1} \cos \varphi_0 + \\ &+ l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{objj}}{m_{ci}} (-\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + \\ &+ f(\sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) - N_{xij} \sin \varphi_0 \\ 0 &= \frac{N_{r1,0}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{1,0}}{y_{0,0} - y_{1,0}})) + \frac{N_{r0,1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{0,0} - z_{0,1}}{y_{0,0} - y_{0,1}})) - N_{x01} \sin \varphi_0 - \\ &- g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) + \frac{N_{objj}}{m_{ci}} (\cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0 + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 + \\ &+ f(\cos \frac{\varphi}{2} \cos \varphi_0 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi_0)) - N_{x01} \cos \varphi_0 \end{aligned} \right. , \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri,1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,0} - z_{i,1}}{y_{i,0} - y_{i,1}})) + \frac{N_{ri-1,0}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,0} - z_{i-1,0}}{y_{i,0} - y_{i-1,0}})) - N_{ri1} \cos \varphi_0 + \\ &+ l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \\ 0 &= \frac{N_{ri,1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,0} - z_{i,1}}{y_{i,0} - y_{i,1}})) + \frac{N_{ri-1,0}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,0} - z_{i-1,0}}{y_{i,0} - y_{i-1,0}})) - N_{ri1} \sin \varphi_0 - \\ &- g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \end{aligned} \right. , \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \cos(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) + l_i \omega^2 \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \\ 0 &= \frac{N_{ri,j-1}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i,j-1}}{y_{i,j} - y_{i,j-1}})) + \frac{N_{ri-1,j}}{m_{ci}} \sin(\arctg(\frac{z_{i,j} - z_{i-1,j}}{y_{i,j} - y_{i-1,j}})) - g - l_i \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \varphi_0\right) \end{aligned} \right. , \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные выражения (15–23) позволяют составить систему уравнений, описывающую поведение снежной массы в роторе снегоочистителя. Общее количество уравнений, необходимых для описания снежного массива, будет равно

$$4 \cdot K_{N1} + 4 \cdot K_{N2} + 4 \cdot K_{N3} + 3 \cdot K_{N4} + 3 \cdot K_{N5} + 3 \cdot K_{N6} , \quad (24)$$

где K_{Ni} – количество частиц соответствующего положения в массиве (см. рисунок 1).

Данная система является системой линейных уравнений и может быть решена на ЭВМ методом Гаусса [16, 17, 18].

В результате решения составленной системы уравнений однозначно определяются численные значения нормальных реакций кожуха ротора роторного снегоочистителя, лопасти ротора и взаимодействия соседних частиц, а также направления их действия в каждый момент времени. Такие данные позволяют определить мощность, необходимую для транспортирования снежной массы, напряжения и деформации, возникающие в конструктивных элементах метательного аппарата.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель и уравнения движения, составленные на ее основе, позволяют однозначно определить значения всех действующих сил на снежную массу в процессе ее транспортирования в роторе роторного снегоочистителя. При этом для решения полученной системы уравнений

может быть использован достаточно простой алгоритм – метод Гаусса.

Следует отметить, что рассматриваемая модель позволяет моделировать снежную массу в межлопастном пространстве более сложной конфигурации и совокупности частиц, имеющих нерегулярное распределение по размерам и взаимному положению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пеленко В. В., Похольченко В. А., Усманов И. И. Математическое моделирование и расчет конструктивных параметров измельчителей с переменным шагом винтовой линии шнека // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20, № 3. С. 556–562. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-556-562.
2. Беляев Д. А., Бакач В. А., Федорченко И. С. Малогабаритный грунтотмет для борьбы с лесными низовыми пожарами // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции: Лесозащита и комплексное использование древесины. 2021. С. 27–30.
3. Teterina I. A., Korchagin P. A., Aleshkov D. S. (2019) Investigation into Effects of the Utility Machine Performance Characteristics on the Vibration at the Operator's Workplace. 12th International

Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". С. 8601434. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601434.

4. Закиров М. Ф. Оптимизация рабочей скорости фрезерно-роторного снегоочистителя // Строительные и дорожные машины. 2015. № 10. С. 55–57.

5. Masanov G. K., Zhakishhev B. A., Taybasarov Zh. K., Imambaev N. S. (2019) Development prototype of the utility model "mobile mechanized ice AX (snowplow) MMI-2010". *Science and World*. № 5-2(69). pp. 54-56.

6. Shenvi Mohit & Sandu Corina & Untaroiu Costin (2022). Review of compressed snow mechanics: Testing methods. *Journal of Terramechanics*. № 100. pp. 25-37. DOI: 10.1016/j.jterra.2021.11.006.

7. Клигунова З. А. Воскресенский Г. Г. Моделирование процесса перемещения грунта бульдозером // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. Т. 1, № 1. С. 147–150.

8. Denisova L., Meshcheryakov V. A. (2019) Predictor-based adaptive control system with stability analysis. *IFAC-PapersOnLine*. № 52 (13). pp. 486-491. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.110

9. Летопольский А. Б., Корчагин П. А., Тетерина И. А., Тетерин И. А. Совершенствование конструкции режущей части проходческого щита. Известия высших учебных заведений // Горный журнал. 2021. № 4. С. 74–82. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-74-82.

10. Алешков Д. С., Суковин М. В. Модель формирования снежных валов при работе фрезерно-роторного снегоочистителя // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10, № 6. 58 с.

11. Zakirov M. F. (2020) The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. С. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012043.

12. Bobillier G., Bergfeld B., Capelli A., Dual J., Gaume J., Herwijnen A., and Schweizer J. (2020) Micromechanical modeling of snow failure. *Cryosphere*. №14. pp. 39-49. DOI: 10.5194/tc-14-39-2020

13. Bartenev I., Malyukov S., Malyukova M. (2020) Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 595:012013. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012013.

14. Мерданов Ш. М., Конев В. В., Мальцева Л. П. Повышение эффективности плужной снегоборочной машины // Фундаментальные исследования. 2016. № 5 (часть 3). С. 491–496.

15. Bartenev I., Malyukov S., Malyukova M. (2020) Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 595:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012013>.

16. Aleshkov D. S., Sukovin M. V., Banket M. V. (2021) Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation. *Journal of Applied Engineering Science*. Vol. 19. № 1. pp. 9-16. DOI: 10.5937/jaes0-28018.

17. Твердохлебов В. А. Определение рационального состава транспортно-технологического комплекса, задействованного в снегоборочных работах // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 6. С. 120–124.

18. Yu, Z.-X & Zhu, Fu & Cao, Rui Zhou & Xiaoxiao, Chen & Zhao, Lei & Zhao, Shichun. (2019) Wind tunnel tests and CFD simulations for snow redistribution on roofs 3D stepped flat roofs. *Wind and Structures An International Journal*. № 28. pp. 31-47. DOI: 10.12989/was.2019.28.1.031.

REFERENCES

1. Pelenko V. V., Pohl'chenko V. A., Usmanov I. I. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet konstruktivnykh parametrov izmel'chiteley s peremennym shagom vintovoy linii shneka* [Mathematical modeling and design parameters of crushing machines with variable-pitch helix of the screw]. *Vestnik MG TU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017; T. 20. No. 3: 556-562. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-556-562. (In Russ.)

2. Beljaev D. A., Bakach V. A., Fedorchenko I. S. *Malogabaritnyj gruntomet dlja bor'by s lesnymi nizovymi pozharemi* [Small-sized primer for fighting forest grass-roots fires]. *Sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Lesojeksplyuatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny*. 2021: 27-30. (In Russ.)

3. Teterina I. A., Korchagin P. A., Aleshkov D. S. (2019) Investigation into Effects of the Utility Machine Performance Characteristics on the Vibration at the Operator's Workplace. 12th International Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". С. 8601434. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601434.

4. Zakirov M. F. *Optimizacija rabochej skorosti frezerno-rotornogo snegoochistitelja* [Optimization of the operating speed of the milling and rotary snowplow. *Construction and Road Machinery*]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2015; 10: 55-57. (In Russ.)

5. Masanov G. K., Zhakishhev B. A., Taybasarov Zh. K., Imambaev N. S. (2019) Development prototype of the utility model "mobile mechanized ice AX (snowplow) MMI-2010". *Science and World*. 2019; 5-2(69): 54-56.

6. Shenvi Mohit & Sandu Corina & Untaroiu Costin (2022). *Review of compressed snow mechanics: Testing methods*. *Journal of Terramechanics*. 2022; 100: 25-37. DOI: 10.1016/j.jterra.2021.11.006.

7. Kligunova Z. A. Voskresenskij G. G. *Modelirovanie processa peremeshhenija grunta bul'dozerom* [Simulation of soil movement by bulldozer]. *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2020; T. 1. № 1: 147-150. (In Russ.)

8. Denisova L., Meshcheryakov V. A. (2019) Predictor-based adaptive control system with stability analysis. *IFAC-PapersOnLine*. 2019; 52 (13): 486-491. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.110.

9. Letopol'skij A. B., Korchagin P. A., Teterina I. A., Teterin I. A. Sovershenstvovanie konstrukcii rezhushhej chasti prohodcheskogo shhita. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij* [Improving the design of the tunneling shield cutting working body]. *Gornyj zhurnal*. 2021; 4: 74-82. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-74-82. (In Russ.)

10. Aleshkov D. S., Sukovin M. V. Model' formirovaniya snezhnyh valov pri rabote frezerno-rotornogo snegoochistitelja [Model of formation of snow shafts during operation of a milling and rotary snow cleaner]. *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2018; T. 10. № 6: 58. (In Russ.)

11. Zakirov M. F. (2020) The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. C. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012043.

12. Bobillier G., Bergfeld B., Capelli A., Dual J., Gaume J., Herwijnen A., and Schweizer J. (2020) Micromechanical modeling of snow failure. *Cryosphere*. 2020;14: 39-49. DOI: 10.5194/tc-14-39-2020

13. Bartenev I., Malyukov S., Malyukova M. (2020) Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 595:012013. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012013.

14. Merdanov Sh. M. Konev V. V., Mal'ceva L. P. Povyshenie jeffektivnosti pluzhnoj snegouborochnoj mashiny [Improved efficiency of plowing snow blower]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016; 5-3:491-496. (In Russ.)

15. Bartenev I., Malyukov S., Malyukova M. (2020) Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 595:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012013>.

16. Aleshkov D. S., Sukovin M. V., Banket M. V. (2021) Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; Vol. 19. № 1: 9-16. DOI: 10.5937/jaes0-28018.

17. Tverdohlebov V. A. Opredelenie racional'nogo sostava transportno-tehnologicheskogo kompleksa, zadejstvovannogo v snegouborochnyh rabotah. Intel'ekt [Determination of the rational composition of the transport and technological complex involved in snow removal operations]. *Innovacii. investicii*. 2016; 6:120-124. (In Russ.)

18. Yu, Z.-X & Zhu, Fu & Cao, Rui Zhou & Xiaoxiao, Chen & Zhao, Lei & Zhao, Shichun. (2019) Wind tunnel tests and CFD simulations for snow redistribution on roofs 3D stepped flat roofs. *Wind and Structures An International Journal*. 2019; 28: 31-47. DOI: 10.12989/was.2019.28.1.031.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов научной статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each author has an equal share of contributions to the theoretical sections of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Корчагин Павел Александрович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Подъемно-транспортные машины, механика и гидропривод».

Тетерина Ирина Алексеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского управления.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Aleshkov – Cand. of Sci, Associate Professor, Technosphere and Environmental Safety Department.

Pavel A. Korchagin – Dr. of Sci., Professor, Lifting and Transport Machines, Mechanics and Hydraulic Drive Department.

Irina A. Teterina – Cand. of Sci, Senior Researcher of the Research Department.

УДК 621.928.235

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636>

EDN: FZXZKI

Научная статья



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИБРОУДАРНОЙ РЕШЕТКИ И СИТА ГРОХОТА В РЕЖИМЕ СИНФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В. С. Сизиков^{*1}, С. А. Сизиков²¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия²ЗАО НИПКБ «Стройтехника»,
г. Санкт-Петербург, Россияsizikovvs@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9438-5711>sizikovsa@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2492-4972>^{*}ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных технологических операций в строительном производстве является процесс классификации по крупности мелкозернистых минеральных материалов, например, природных песков. При этом актуальным является решение задачи повышения производительности и эффективности грохочения песчаных сред, в частности достижением снижения засоренности просеивающей поверхности виброгрохотов от замазывания и застревания в отверстиях сита клинообразных зерен. Устранение этой проблемы осуществляется путем применения виброударных грохотов различного принципа действия. К инновационным конструкциям виброударных грохотов относится грохот с виброударной решеткой, установленной на упругих элементах с зазором относительно сита и обеспечивающей удар по всей площади поверхности сита. Такая конструкция обеспечивает повышение эффективности очистки сита за счет передачи ему ударного импульса в каждом периоде колебаний грохота, и позволяет снизить чрезмерное повреждение и износ сита за счет увеличения площади взаимодействия виброударной решетки с ситом.

Целью работы является установление функциональной зависимости динамического взаимодействия элементов трехмассовой виброударной системы «корпус грохота – виброударная решетка – сито» для определения необходимой величины передаваемого на сито ударного импульса в зависимости от частоты колебаний корпуса грохота и величины зазора между решеткой и ситом.

Материалы и методы. Исследование выполняется методом математического моделирования с использованием на первом этапе двухмассовой модели «корпус грохота – виброударная решетка» без учета соударений решетки и сита для определения частотного диапазона синфазного режима колебаний и значений зазора, обеспечивающих соударение решетки с ситом. Для расчета перемещений элементов грохота и исследования взаимосвязей его параметров в выбранном диапазоне на втором этапе используется трехмассовая модель виброударной системы грохота с одной ударной парой.

Результаты. В результате выполненного исследования получены зависимости в виде уравнений регрессии влияния зазора между виброударной решеткой и ситом грохота и частоты его колебаний на величину ударного импульса, передаваемого на сито грохота, и размах колебаний сита. На основе полученных зависимостей предложены практические рекомендации по настройке режимов работы виброударного грохота, позволяющие подбирать величину частоты колебаний грохота и зазора между виброударной решеткой и ситом для достижения высокой эффективности очистки ячеек сита от загрязняющих частиц.

Обсуждение и заключение. Выполненное математическое моделирование позволило получить зависимости влияния зазора между ситом и виброударной решеткой и частоты колебаний элементов грохота на ударный импульс, передаваемый на сито грохота, и размах колебаний сита. Разработанные рекомендации для практического применения полученных закономерностей позволят выполнять эффективную настройку режимов работы виброударного грохота и снизить трудоемкость работ, выполняемых при его пусконаладке и эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: виброударный грохот, виброударная система, ударная пара, ударный импульс, очистка поверхности сита, виброударная решетка, зазор, управление режимами работы, колебательная система, деформационные характеристики сита, загрязняющие частицы.

© Сизиков В. С., Сизиков С. А., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 03.09.2022; одобрена после рецензирования 26.09.2022; принята к публикации 14.10. 2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сизиков В. С., Сизиков С. А. Взаимодействие виброударной решетки и сита грохота в режиме синфазных колебаний // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 624-636. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-624-636>

EDN: FZXZKI

INTERACTION OF VIBROIMPACT LATTICE AND SCREEN SIEVE IN ANTI-PHASE OSCILLATION MODE

Valentin S. Sizikov^{*1}, Stanislav A. Sizikov²

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Saint Petersburg, Russian

ZAO NIPKB Stroitekhnik,

Saint Petersburg, Russian

sizikovvs@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9438-5711>

sizikovsa@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2492-4972>

^{*}corresponding author

ABSTRACT

Introduction. One of basic technological operations in construction technology is a process of classification of fine grained mineral materials, for example, natural sand. The related actual problem is connected with increasing performance and effectiveness of screening of sand medium, in particular reducing the contamination of screening surface of vibrating screens from seal particles and sticking in sieve holes wedge-shaped grains. The solution of this problem concludes in performing by the use of vibroimpact screens of various operating principle. One of innovative vibroimpact screen constructions is a screen with vibroimpact lattice, mounted under sieve with a gap on spring elements, which provides an impulse impact on all sieve surface area. Such construction provides increasing the effectiveness of sieve cleaning due to the transfer to sieve impact impulse in each screen oscillation period and reducing its excessive damage and abrasion by increasing the area of vibroimpact lattice and sieve interaction. The purpose of the work is to determinate functional relationships of dynamical interaction between elements of three-mass vibroimpact 'screen body – vibroimpact lattice – sieve' system for providing the necessary value of impact impulse transferred to sieve in relation to screen body oscillation frequency and amount of gap between lattice and sieve.

Materials and methods. The research is based on a method of mathematical modelling. On the first stage the research is being conducted with using two-mass 'screen body – vibroimpact lattice' model without consideration the impact between lattice and sieve for determination the oscillation frequency range of in-phase oscillation regime and gap values providing an impact between lattice and sieve. For the calculation of displacement of screen elements and for research the relationships of its parameters in selected range the three-mass model of vibroimpact model of screen with one impact pair is used on a second stage of research.

Results. As a result of calculation obtained the functional relationships of correlation of the gap between vibroimpact lattice and screen sieve and oscillation frequency on the impact impulse transferred to sieve and sieve double amplitude were obtained. The developed recommendations for practical using of obtained relationships for adjustment operating regimes of vibroimpact screen which allow to establish the screen operating oscillation frequency and value of gap between lattice and sieve for providing high effectiveness of sieve holes cleaning from contaminating particles.

Discussion and Conclusions. Performed mathematical modelling allowed to obtain dependencies of influence of gap between sieve and vibroimpact lattice and screen elements oscillation frequency on impulse transferred on screen sieve and sieve double amplitude. Developed practical recommendations of obtained dependencies allow to perform an effective adjustment of vibroimpact screen operating regimes and reduce the labor intensity of works being performed during its starting-up and maintenance.

© Sizikov V. S., Sizikov S. A., 2022



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

KEYWORDS: *vibroimpact screen, vibroimpact system, impact pair, impact impulse, sieve surface cleaning, vibroimpact lattice, gap, operation regimes control, oscillatory system, sieve deformation parameters, contaminating particles.*

ACKNOWLEDGMENTS. *The article is published based on the results of the research work carried out in accordance with the grant for the performance of research work by the academic staff of Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering in 2022.*

The article was submitted 03.09.2022; approved after reviewing 26.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Valentin S. Sizikov, Stanislav A. Sizikov Interaction of vibroimpact lattice and screen sieve in anti-phase oscillation mode. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 624-636. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636>

ВВЕДЕНИЕ

В строительстве для классификации сыпучих материалов по крупности широко применяются вибрационные грохоты, представляющие собой колеблющийся корпус с закрепленной на нем просеивающей поверхностью с калиброванными отверстиями. В процессе грохочения материала возникает проблема засорения просеивающих поверхностей зернами клиновидной или ступенчатой формы, а также залипания ее отверстий глинистыми и другими вязкими материалами, что уменьшает живое сечение сита и затрудняет прохождение через него частиц мелкого класса и неизбежно приводит к чрезмерному замельчению надрешетного продукта [1, 2]. Для очистки сит грохотов от загрязняющих зерен и замазывающих илистых и глинистых материалов широко применяются разнообразные механические устройства, передающие на сито ударные импульсы движущимися элементами¹ [3, 4, 5, 6, 7]. Одной из простых и эффективных конструкций является инновационный грохот² с виброударной решеткой, приводимой в движение колебаниями корпуса. Схема взаимодействия конструктивных элементов такого виброударного грохота показана на рисунке 1, а расчетная схема – на рисунке 2.

Грохот (см. рисунок 1) включает корпус 1, установленный на основании на опорных пружинах 2, и закрепленное на нем сито 3. Под ситом на специальных прокладках 4 установлены пружины взаимодействия 5 и смонтиро-

ванный на них ударный элемент 6 в виде виброударной решетки, ширина которой близка по ширине к поперечному размеру сита грохота. Под действием гармонической вынуждающей силы $P\sin(\omega t)$, передаваемой на корпус грохота вибровозбудителем направленного действия 7, решетка приводится в движение и совершает направленные колебания, ударяя по ситу в каждом периоде колебаний. Между решеткой и ситом имеется регулировочный зазор e , устанавливаемый в статическом положении грохота для управления величиной ударного импульса, передаваемого на сито. Регулирование величины импульса осуществляется двумя параметрами: зазором e между ударной решеткой и ситом и частотой колебаний корпуса грохота.

Настройка рассматриваемого виброударного грохота на эффективные режимы работы является сложной задачей, поскольку механическая система грохота относится к классу виброударных систем (ВУС), и закономерности их движения нелинейно зависят от параметров системы. Как правило, для различных массогабаритных ВУС приходится выполнять отдельные исследования параметров колебаний элементов. Для экономии ресурсов подобные исследования по установлению взаимосвязей между параметрами движения сита и виброударной решетки и регулировочным зазором и частотой колебаний целесообразно выполнять методом математического моделирования.

¹ Многочастотная вибрационная сепараторная система, вибрационный сепаратор, содержащий эту систему, и способ вибрационной сепарации твердых частиц: пат. 2256515 Рос. Федерация. № 2001129167/03; заявл. 28.03.2000; опубл. 20.08.2003, Бюл. № 23. 51 с.

² Виброударный грохот: пат. 210586 Рос. Федерация. № 2021118793; заявл. 28.06.2021; опубл. 21.04.2022, Бюл. № 12. 2 с.

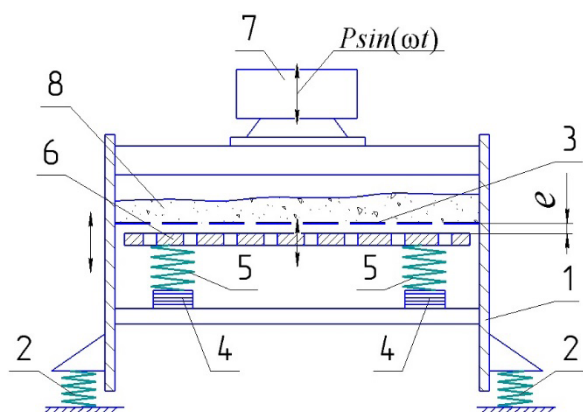


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения виброударного грохота: 1 – корпус грохота; 2 – опорные пружины; 3 – сито грохота; 4 – прокладки регулирования зазора e ; 5 – пружины взаимодействия; 6 – виброударная решетка; 7 – вибровозбудитель направленных колебаний; 8 – классифицируемый материал; e – зазор между виброударной решеткой и ситом; $P \sin(\omega t)$ – направленная вынуждающая сила; P – амплитудное значение вынуждающей силы; ω – частота колебаний
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Vibroimpact screen scheme (cross-section):

1 – screen body; 2 – supporting springs; 3 – screen sieve; 4 – gaskets for gap e adjusting; 5 – interaction springs; 6 – vibroimpact lattice; 7 – directional vibration exciter; 8 – classifying material; e – gap between vibroimpact lattice and sieve; $P \sin(\omega t)$ – directional excitation force; P – amplitude value of exiting force; ω – oscillation frequency
Source: compiled by the authors.

Исследованию процесса взаимодействия элементов виброударных грохотов посвящено большое число работ [5, 6, 7, 8, 9, 10], однако задача определения влияния регулировочного зазора и частоты колебаний на передаваемый сита ударный импульс и размах колебаний сита не являлась в этих работах предметом специального внимания, либо не была проработана достаточно глубоко. В частности, для рассматриваемой трехмассовой ВУС грохота с наличием зазора между двумя соударяющимися массами, взаимодействующими по схеме (см. рисунок 2), подробные исследования такого типа ранее не выполнялись.

По принятой классификации ВУС данная система «корпус грохота – виброударная решетка – сито» относится к классу трехмассовых ВУС с одной ударной парой с начальным зазором [11]. В рассматриваемой ВУС возможно существование нескольких разнообразных режимов периодического движения (с одним,

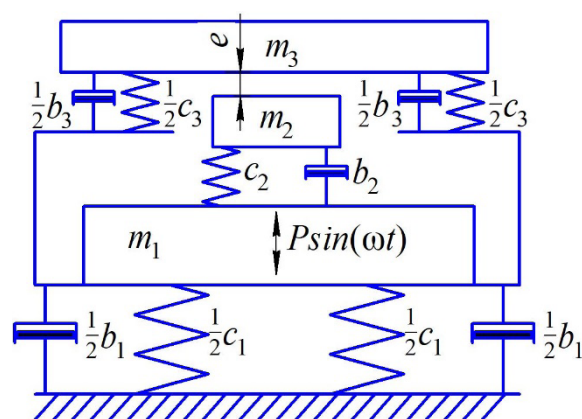


Рисунок 2 – Расчетная схема виброударного грохота для интервала безударного движения виброударной решетки и сита (для положения статического равновесия системы): m_1 , m_2 , m_3 – массы корпуса грохота, виброударной решетки и сита; c_1 , c_2 – коэффициенты жесткости опорных пружин и пружин взаимодействия; c_3 – коэффициент жесткости сита при деформировании в поперечном направлении; b_1 , b_2 и b_3 – коэффициенты демпфирования пружин и сита грохота при деформации; e – зазор; $P \sin(\omega t)$ – вертикальная вынуждающая сила вибровозбудителя
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Computational scheme of vibro-impact screen for the period of nonimpact motion of vibroimpact lattice and sieve (for the static equilibrium state of the system):

m_1 , m_2 , m_3 – masses of screen body, vibroimpact lattice and sieve; c_1 , c_2 – stiffness coefficients of supporting springs and interaction springs; c_3 – stiffness coefficient of transverse sieve deformation; b_1 , b_2 , b_3 – viscous coefficients of springs and screen sieve under deformation; e – gap; $P \sin(\omega t)$ – vertical excitation force of vibration exciter
Source: compiled by the authors.

двумя, четырьмя ударами за период или с одним соударением за несколько периодов), может возникать увод (когда звенья системы колеблются не вблизи своих положений равновесия, а вблизи некоторых смещенных положений динамического равновесия) и неустойчивые режимы движения [11]. Поэтому изучение динамики движения такой системы является сложной задачей, требующей применения специальных методов исследования. Наиболее распространенными методами расчета колебаний ВУС являются приближенные методы, направленные на отыскание установившегося режима движения элементов механической системы с помощью линеаризации уравнений движения, а также точные методы решения уравнений движения [11, 12, 13].

Отметим, что процесс очистки поверхности сита от загрязнений в этих режимах может происходить по-разному. В частности, в режиме противофазных колебаний удар по

ситу происходит в момент, когда решетка и сито с находящимся на ней слоем материала движутся навстречу друг другу. В этом случае слой, лежащий на сите, препятствует выбиванию частиц вверх из ячеек сита, что приводит при ударе к проскакиванию через ячейки сита относительно крупных зерен в подрешетный продукт и тем самым к увеличению попадания крупных частиц в мелкий подрешетный продукт, что снижает эффективность грохочения.

В режиме синфазных колебаний решетки и сита удар по ситу происходит в момент, когда оба элемента двигаются вверх и решетка догоняет сито. В этот момент слой материала совершает свободный полет над ситом, и застрявшие в ячейках сита зерна могут беспрепятственно выбиваться из ячеек сита вверх, оставаясь при этом в надрешетном продукте. Из сказанного следует, что для качественного грохочения синфазный режим является более предпочтительным.

Интенсивность очистки сита как в синфазном, так и в противофазном режимах колебаний, – будет зависеть от физико-механических свойств классифицируемого материала и будет различной при грохочении твердых, вязких и глинистых материалов. Поэтому для каждого материала следует выполнять отдельную экспериментальную оценку эффективности очистки сита.

В настоящей работе выполняется исследование взаимодействия элементов виброударного грохота при синфазном режиме колебаний виброударной решетки и сита. Определение закономерностей взаимодействия элементов виброударной системы позволит подбирать ее параметры для обеспечения заданных режимов движения рабочих элементов и тем самым даст возможность при настройке грохота управлять режимами его работы для выбора наилучших режимов очистки сита виброударной решеткой при поддержании требуемой эффективности процесса грохочения. Прак-

тической целью такого управления является снижение трудоемкости работ, выполняемых в процессе пуска наладки и эксплуатации виброударного грохота.

Целью исследования является установление влияния зазора и частоты колебаний виброударной системы грохота на величину ударного импульса, передаваемого решеткой на сито виброударного грохота в синфазном режиме их колебаний, для настройки эффективных режимов работы виброударного грохота.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) определить границы диапазонов параметров режимов работы виброударного грохота, обеспечивающие синфазный режим колебаний виброударной решетки и сита;
- 2) установить закономерности изменения передаваемого на сито ударного импульса в зависимости от величины зазора между виброударной решеткой и ситом и частоты колебаний грохота;
- 3) разработать практические рекомендации по настройке величины ударного импульса, передаваемого виброударной решеткой на сито грохота, для повышения эффективности очистки ячеек сита от засорения их труднопроходимыми частицами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача исследования параметров движения элементов виброударной системы грохота для синфазного режима колебаний виброударной решетки и сита решается с помощью трехмассовой модели «корпус грохота – виброударная решетка – сито», приведенной в работе [14]. Расчетная схема рассматриваемой модели представлена на рисунке 2, значения используемых в модели численных параметров конструктивных элементов грохота – в таблице 1 [8, 14]. В настоящем исследовании учитываются только вертикальные составляющие колебаний элементов системы.

Таблица 1
Расчетные конструктивные параметры виброударного грохота [8]

Table 1
Calculation design parameters of vibroimpact screen [8]

Параметр									
m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	c_1 , кН/м	c_2 , кН/м	c_3 , кН/м	P , кН	b_1 , кН·с/м	b_2 , кН·с/м	b_3 , кН·с/м
880,0	180,0	20,5	300,0	1 380,1	807,5	25,0	3,6	2,091	4,8

В системе существует два характерных интервала движения виброударной решетки и сита – интервал бесконтактного движения обоих элементов системы, на котором решетка и сито перемещаются независимо друг от друга до момента соударения, и интервал их движения в контакте, в течение которого оба элемента перемещаются как одно твердое тело. Поиск установившихся периодических режимов движения элементов системы в настоящей работе выполняется методом припасовывания нахождения решений линейных дифференциальных уравнений движения на каждом интервале движения и связыванием соответствующих координат и скоростей элементов рассматриваемой системы на границах интервалов [11]. Уравнения движения решаются методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности с помощью специально разработанной компьютерной программы. Полное математическое описание движения рассматриваемой виброударной системы грохота приведено в работе [14].

Границы области синфазного режима колебаний виброударной решетки и сита определяются по известному методу, изложенному, например, в работе [15], где для двухмассовой

колебательной системы области синфазного режима колебаний соответствуют рабочей частоте колебаний из диапазона $k_1 < \omega < n_2$, где k_1 – низшая собственная частота колебаний двухмассовой системы, n_2 – парциальная частота колебаний решетки, т. е. собственная частота колебаний массы m_2 при неподвижной массе m_1 . На рисунке 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) перемещений элементов двухмассовой системы, построенные для принятых численных параметров элементов конструкции грохота (см. таблицу 1). Определим границы диапазонов частоты колебаний ω и зазора e для принятых численных значений параметров системы.

Частота колебаний назначается с отстройкой от резонансных частот, чтобы отклонения частоты при работе грохота не приводили к существенным изменениям амплитуд колебаний сита и виброударной решетки. С учетом этого примем диапазон $50 \text{ рад/с} < \omega < 75 \text{ рад/с}$, соответствующий наиболее пологим участкам АЧХ решетки и корпуса грохота по сравнению с двумя другими участками синфазного режима колебаний: $k_1 < \omega < \omega_1 \text{ рад/с}$ и $\omega_2 < \omega < n_2$ (см. рисунок 3).

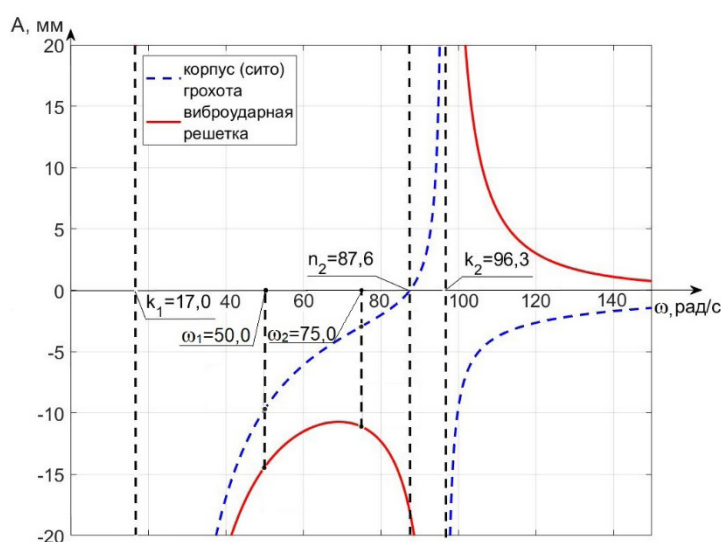


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики перемещений корпуса грохота m_1 (с безынерционным ситом m_2) и виброударной решетки m_2 для двухмассовой системы «корпус грохота – виброударная решетка»: k_1, k_2 – собственные частоты колебаний системы; n_2 – парциальная частота колебаний массы m_2 ; ω_1, ω_2 – нижняя и верхняя границы исследуемого частотного диапазона
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics of displacement of screen body m_1 (with inertialless sieve m_2) and vibroimpact lattice m_2 for two-mass system «screen body – vibroimpact lattice»: k_1, k_2 – system oscillations natural frequencies; n_2 – partial frequency of oscillations of mass m_2 ; ω_1, ω_2 – low and high boundaries of being investigated oscillation range
Source: compiled by the authors.

Таблица 2
Уровни факторов и интервалы их варьирования
Источник: составлено авторами.

Table 2
Levels of factors and its variability intervals
Source: compiled by the authors.

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Размерность	Уровни факторов		
				основной 0	верхний +1	нижний -1
ω	x ₁	12,5	рад/с	62,5	75	50
e	x ₂	1,75	мм	1,75	3,5	0

Верхняя граница диапазона зазора e определяется из условия обеспечения удара между виброударной решетки и ситом по условию

$$A_2 - A_1 > e, \tag{1}$$

где A₁, A₂ – амплитуды колебаний сита и виброударной решетки.

Для выполнения этого условия во всем выбранном диапазоне частоты колебаний ω необходимо, чтобы оно выполнялось для участка амплитудно-частотной характеристики, соответствующего наибольшему сближению амплитудно-частотных характеристик корпуса (сита) грохота и решетки, т. е. при минимальном значении A₂–A₁. Это достигается при частоте колебаний ω = ω₁ (см. рисунок 3), когда A₁ = 9,7 мм и A₂ = 14,5 мм, и, следовательно, значение верхней границы зазора e равно 14,5 - 9,7 = 4,8 мм. Примем окончательно значение верхней границы e = 3,5 мм, чтобы обеспечить с запасом выполнение условия (1). В качестве нижней границы исследуемого диапазона принимается значение e = 0, соответствующее контакту сита и решетки в статическом равновесии без натяга.

Уровни и интервалы варьирования факторов, исследуемых в вычислительном эксперименте, приведены в таблице 2.

Проводится две серии опытов: сначала выполняется несколько отдельных расчетов с варьированием одного исследуемого фактора при неизменных значениях других параметров с целью оценки качественного влияния этого параметра на ударный импульс, передаваемо-

го на сито, и размах колебаний сита. Уравнение для определения исследуемого ударного импульса получается из закона сохранения импульса:

$$S = m_3 (\dot{y}_{23} - \dot{y}_3), \tag{2}$$

где $\dot{y}_3$ – скорость движения в момент времени, предшествующий соударению с решеткой; $\dot{y}_{23}$ – скорость решетки и сита в момент времени сразу после соударения.

Размах колебаний сита R определяется как разность координаты верхнего и нижнего положения сита, служит для оценки динамической нагруженности сита при вибрации.

Во второй серии опытов определяются уравнения регрессии ударного импульса и размаха колебаний сита от частоты колебаний и зазора для выбранных значений параметров ВУС грохота [8, 14]. Для проведения вычислительного эксперимента методом экстремального планирования выбран центральный композиционный план с одним опытом в центре плана.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты выполненных расчетов параметров колебаний виброударной системы «корпус грохота – виброударная решетка – сито грохота» при различных значениях частоты колебаний для принятых параметров ВУС грохота и зазора между виброударной решеткой и ситом грохота приведены на рисунках 4 и 5.

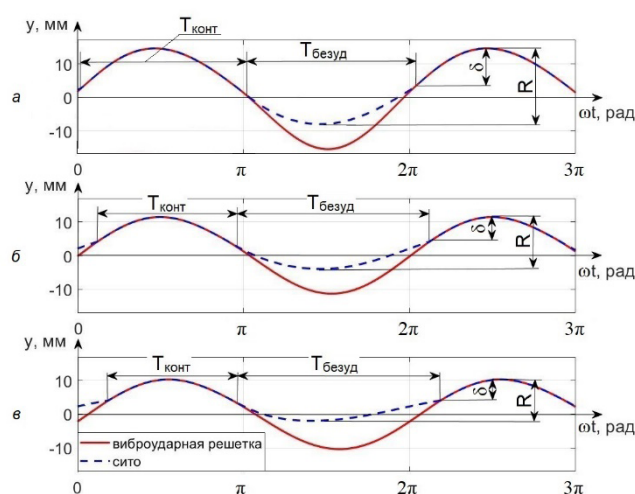


Рисунок 4 – Перемещения сита и виброударной решетки при регулировочном зазоре $e = 1,75$ мм:
 а – частота колебаний $\omega = 50$ рад/с;
 б – частота колебаний $\omega = 62,5$ рад/с;
 в – частота колебаний $\omega = 75$ рад/с
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Displacement of sieve and vibroimpact lattice for adjustment gap $e = 1,75$ mm:
 а – oscillation frequency $\omega = 50$ rad/s;
 б – oscillation frequency $\omega = 62,5$ rad/s; в – oscillation frequency $\omega = 75$ rad/s
 Source: compiled by the authors.

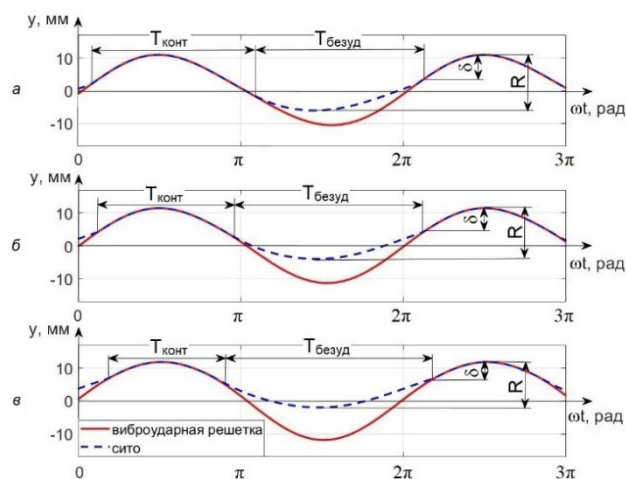


Рисунок 5 – Перемещения сита и виброударной решетки при частоте колебаний $\omega = 62,5$ рад/с:
 а – зазор $e = 0$ мм; б – зазор $e = 1,75$ мм;
 в – зазор $e = 3,5$ мм
 Источник: составлено авторами.

Figure 5. Displacement of sieve and vibroimpact lattice for oscillation frequency $\omega = 62,5$ rad/s:
 а – gap $e = 0$ mm; б – gap $e = 1,75$ mm;
 в – gap $e = 3,5$ mm
 Source: compiled by the authors.

На графиках (см. рисунки 4 и 5) показаны продолжительности движения сита и виброударной решетки на интервале их движения в контакте $T_{\text{конт}}$ и интервале безударного движения $T_{\text{безуд}}$, размах колебаний сита R и величина поперечного деформирования сита виброударной решеткой δ . Удар по ситу происходит в период, когда слой материала совершает свободный полет над ситом.

При увеличении частоты колебаний (см. рисунок 4) размах колебаний сита R уменьшается, как это видно на АЧХ двухмассовой системы (см. рисунок 3). При этом интервал движения решетки в контакте с ситом $T_{\text{конт}}$ уменьшается, а интервал их безударного движения $T_{\text{безуд}}$, наоборот, увеличивается. Также увеличивается и передаваемый на сито решеткой ударный импульс S : при частотах колебаний 50 рад/с, 62,5 рад/с и 75 рад/с импульс, рассчитываемый по формуле (2), принимает соответственно значения 4,64, 6,51 и 10,51 кг·м/с. Это происходит из-за увеличения относительной скорости виброударной решетки и сита, определяемой в момент соударения.

При увеличении зазора e между виброударной решеткой и ситом размах колебаний сита R уменьшается, при этом возрастает интервал безударного движения решетки с ситом $T_{\text{безуд}}$ и уменьшается интервал их движения в контакте $T_{\text{конт}}$ (см. рисунок 5). При этом передаваемый ситу ударный импульс S , рассчитываемый по формуле (2), уменьшается, по-

следовательно принимая расчетные значения 7,35, 6,51 и 4,73 кг·м/с при соответствующих значениях зазора 0, 1,75 и 3,5 мм. Это объясняется следующим: при увеличении зазора момент соударения виброударной решетки с ситом наступает позднее (см. рисунок 5), величина скорости движения решетки в момент соударения становится меньше, что уменьшает относительную скорость решетки и сита в момент удара, а значит, и величину передаваемого ситу ударного импульса.

Полученные результаты расчета показывают, что в рассматриваемом частном случае изменение частоты колебаний грохота в большей степени влияет на изменение передаваемого ситу ударного импульса и размах колебаний сита, чем изменение величины зазора.

Далее приведем уравнения регрессии для определения влияния зазора e между решеткой и ситом и частоты колебаний ω на ударный импульс и размах колебаний сита, которые определены методом вычислительного эксперимента с применением матрицы планирования, приведенной в таблице 3. При планировании эксперимента принято, что уравнения регрессии представляются полиномами второго порядка. Погрешность при измерении величины ударного импульса составила менее 6,4%, размаха колебаний сита – менее 1,1%. Результаты эксперимента и рассчитанные коэффициенты уравнений регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3
Матрица планирования эксперимента и результаты опытов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Design matrix and results of experiments
Source: compiled by the authors.

Номер опыта		Факторы (кодированные значения)		Факторы (натуральные значения)		Отклик	
		x_1	x_2	ω	e	S , кг·м/с	R , мм
Ядро плана	1	–1	–1	50	0	7,17	24,13
	2	+1	–1	75	0	9,93	13,41
	3	–1	+1	50	3,5	1,31	21,41
	4	+1	+1	75	3,5	10,34	10,95
Звездные точки	5	–1	0	50	1,75	4,64	22,51
	6	+1	0	75	1,75	10,51	12,22
	7	0	–1	62,5	0	7,35	16,95
	8	0	+1	62,5	3,5	4,73	13,81
Центр плана	9	0	0	62,5	1,75	6,51	15,37
Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии						$b_0 = 6,94$ $b_1 = 2,944$ $b_{11} = 0,12233$ $b_2 = -1,345$	$b_0 = 16,75$ $b_1 = -5,245$ $b_{11} = 2,0617$ $b_2 = -1,387$

Таблица 4
Результаты статистической обработки экспериментальных данных
и оценки адекватности регрессионных моделей
Источник: составлено авторами.

Table 4
Results of statistical analysis of experimental data and adequacy evaluation of regression models
Source: compiled by the authors.

Характеристика	Вид модели	Число степеней свободы, f для расчета $s^2_{ад}$	Дисперсия адекватности, $s^2_{ад}$	Дисперсия воспроизводимости, $s^2_{(y)}$	Расчетный критерий Фишера, $F_{расч}$	Табличный критерий Фишера, $F_{табл}$ (при $\alpha = 0,05$)
Ударный импульс S	$S = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2$	5	2,533	8,39	0,362	3,48
	$S = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$	6	2,113		0,252	3,37
Размах колебаний сита R	$R = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2$	5	3,433	20,59	0,167	3,48
	$R = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$	6	1,444		0,070	3,37

Результаты статистической обработки экспериментальных данных и оценки адекватности уравнений регрессии приведены в таблице 4. Статистические характеристики рассчитывались для двух моделей регрессии – квадратичной и линейной.

Из полученных результатов видно, что расчетное значение критерия Фишера для линейных моделей меньше, чем для квадратичной. Это справедливо как для передаваемого на сито ударного импульса S , так и для размаха колебаний сита R . Поэтому окончательные уравнения регрессии имеют линейный вид:

$$S = 6,94 + 2,944x_1 - 1,345x_2, \quad (3)$$

$$R = 16,75 - 5,245x_1 - 1,387x_2. \quad (4)$$

Переходя к натуральным значениям факторов, получаем

$$S = -6,44 + 0,2355\omega - 0,7686e, \quad (5)$$

$$R = 44,36 - 0,4196\omega - 0,7926e. \quad (6)$$

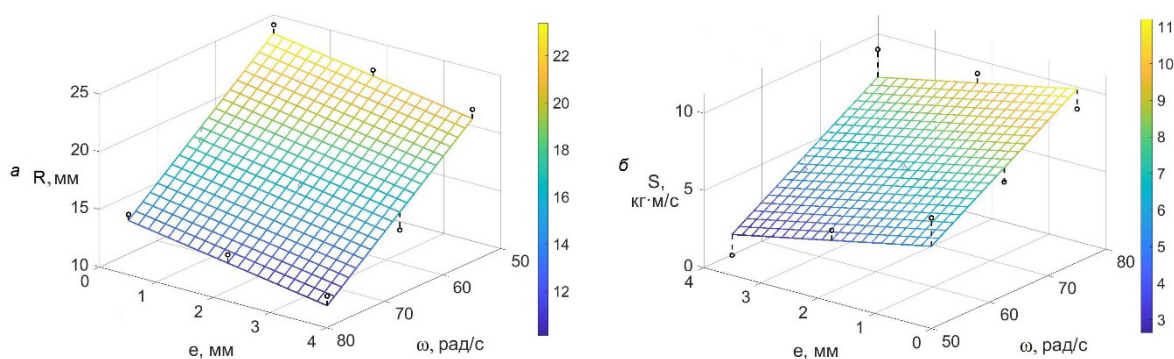


Рисунок 6 – Зависимости параметров взаимодействия сита и виброударной решетки в синфазном режиме от частоты колебаний ω и зазора e ;
а – ударный импульс S , передаваемый на сито; б – размах колебаний сита R
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependences of sieve and vibroimpulse lattice interaction parameters from oscillation frequency ω and gap e for in-phase oscillation regime: а – impact impulse S transmitted to sieve; б – sieve double amplitude R
Source: compiled by the authors.

Графики изменения передаваемого на сито ударного импульса и размаха колебаний сита в зависимости от частоты колебаний и зазора представлены на рисунке 6.

Полученные результаты (уравнения (3), (4), рисунок 6) показывают, что с увеличением зазора одновременно снижается передаваемый сито ударный импульс и размах колебаний решетки. При увеличении частоты колебаний передаваемый на сито ударный импульс увеличивается, а размах колебаний сита – уменьшается. При этом частота колебаний влияет на оба этих параметра в большей степени, чем зазор, что согласуется с результатами, полученными в первой серии опытов (см. рисунки 4 и 5). Данные результаты необходимы для выполнения настройки оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота при изменении физико-механических свойств минеральных сыпучих сред, например, песков, поступающих из карьера. Как известно, при углублении карьера неизбежно происходит изменение фракционного состава песка и содержания частиц клиновидной или ступенчатой формы, а также пылеватых, глинистых и других липких частиц, что приводит к изменению степени засорения ячеек сита труднопроходимыми частицами, а также их залипанию на сите. Это в конечном итоге снижает активную поверхность сита и приводит к увеличению засоренности верхнего класса нижним.

С учетом сказанного, при изменении свойств исходного сырья, т. е. входных параметров регулируемой системы, задача настройки оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота заключается в том, чтобы выходной контролируемый показатель качества грохочения (засоренность верхнего класса нижним) не превышал заданное значение до момента его выхода за пределы допустимых ограничений. При превышении требуемой величины засоренности верхнего класса нижним необходима перенастройка параметров работы грохота выбором большей величины передаваемого на сито ударного импульса, обеспечивающего лучшее прохождение через сито зерен нижнего класса. Для этого, как видно из уравнения регрессии (5) для ударного импульса S , следует увеличивать частоту колебаний грохота ω до достижения необходимой величины выходного показателя качества грохочения. В том случае, если при такой подстройке частота колебаний грохота ω достигнет значения верхней границы рассмотренного диапазона $\omega_2 = 75$ рад/с (см. рисунок 3), но при этом ударный импульс S не будет обеспечивать

удовлетворительное значение показателя качества грохочения, следует уменьшать величину зазора e между виброударной решеткой и ситом грохота, как это видно из формулы (5).

Описанный процесс регулирования режимов работы грохота выполняется циклически с периодом, действующим с момента появления неудовлетворительного значения контролируемого показателя засоренности верхнего класса нижним до наступления следующего такого момента. При этом контроль значений показателя качества грохочения отбором проб материала для лабораторного анализа эффективности грохочения при эксплуатации грохота выполняется ежечасно в соответствии с требованиями ГОСТ 8735–88. При неудовлетворительном результате лабораторного анализа эффективности грохочения необходимо повторно выполнить настройку оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота, при которой по вышеуказанной процедуре выбирают значения частоты колебаний ω и зазора e , обеспечивающие наилучшие параметры очистки сита.

Таким образом, описанный процесс регулирования режимных параметров позволяет выполнять простую и эффективную настройку режимов работы виброударного грохота и снизить трудоемкость выполнения работ, осуществляемых в процессе его пуска и эксплуатации.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальной задачей при классификации зернистых материалов по крупности на вибрационных грохотах является обеспечение режимов работы виброударных устройств для очистки сит от загрязняющих зерен. Решение этой задачи позволяет увеличить живое сечение сита, тем самым повысить качество переработки сыпучих строительных материалов. Данная задача для приведенной конструкции виброударного грохота решается на основе установления закономерностей влияния частоты колебаний и зазора виброударной системы на величину ударного импульса, передаваемого на сито виброударной решеткой, и размах колебаний сита и определения диапазона устойчивых режимов колебаний виброударной системы грохота в режиме синфазных колебаний виброударной решетки и сита.

Поставленная задача решена методом математического моделирования. При этом установлено, что уменьшение зазора и увеличение частоты колебаний позволяет увеличить передаваемый на сито ударный импульс, что обе-

спечивает улучшение процесса очистки сита. На основе этого предложены рекомендации по настройке рациональных режимов работы грохота, заключающиеся в подборе частоты колебаний и зазора между виброударной решеткой и ситом, обеспечивающих высокие значения показателей качества процесса грохочения в условиях непрерывно изменяющихся характеристик поступающего на грохочение исходного материала. Это позволит снизить трудоемкость выполнения работ, осуществляемых в процессе пуска наладки и эксплуатации виброударного грохота.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иткин Г. Е. Контроль крупности минерального сырья автоматическими гранулометрами. М.: Недра, 1986. 88 с.
2. Вайсберг Л. А., Картавый А. Н., Коровников А. Н. Просеивающие поверхности грохотов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.
3. Островский Г. М. [и др.] Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. Ч.2. 916 с.
4. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Изучение кинетики разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья при виброударном грохочении // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. 2013. Т. 53, № 94. С. 179–188.
5. Надутый В. П., Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Математическое моделирование виброударного движения просеивающей поверхности с учетом диссипации для повышения эффективности грохочения // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. 2012. Вип. 1(65). С. 106–109.
6. Надутый В. П., Лапшин Е. С., Хмеленко И. П. Анализ виброударного движения просеивающей поверхности грохота // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. 2009. Вип. 2(54). С. 69–72.
7. Шевченко Г. А., Шевченко В. Г., Бобылев А. А. Вибрационные грохоты с поличастотными колебаниями просеивающих поверхностей для тонкого разделения // Уголь Украины. 2013. № 2. С. 23–29.
8. Евтюков С. А., Сизиков В. С. Динамика взаимодействия рабочих элементов виброударного грохота со слоем перемещаемого материала // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4. С. 133–139.
9. Скрипилов А. П. Теоретическое и экспериментальное исследование виброударного грохота для фракционирования песка // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 5. С. 188–193.
10. Gursky V., Murashev S., Gogol R. Optimal synthesis of the impulsive resonant two-mass vibro-impact systems // Proceedings of III International scientific conference of young scientists Engineering mechanics & transport 2013 (EMT-2013). Lviv: Lviv Polytechnic publishing house. 2013. P. 54–55.
11. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение,

1979. Т.2. Колебания нелинейных механических систем. 351 с.

12. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1977. 224 с.

13. Крупенин В. Л. Прогнозирование режимов движения виброударных систем // Сборник трудов XVIII Международного симпозиума «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» DYVIS-2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А. Е. Кобринского. М.: ИМАШ РАН. 2015. С. 140–148.

14. Сизиков В. С. Расчет параметров грохота с виброударным режимом колебаний сита. НИПКБ «Стройтехника». СПб, 2013. 102 с. Деп. в ВИНТИ 25.11.13, № 329-B2013.

15. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. 444 с.

REFERENCES

1. Itkin G.E. *Kontrol' krupnosti mineral'nogo syr'ya avtomaticheskimi granulometrami* [Control the size of mineral raw materials by automatic granulometers]. Moscow, Nedra, 1986. 88 p. (In Russ.)
2. Vaisberg, L.A., Kartavyi A.N., Korovnikov A.N. *Proseivayushchie poverhnosti grohotov. Konstrukcii, materialy, opyt primeneniya* [Screens screening media. Design, materials, application experience]. Saint Petersburg, VSEGEI, 2005. 252 p. (In Russ.)
3. Ostrovskij G. M. [and oth.] *Novyj spravochnik himika i tekhnologa. Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij* [The new handbook of chemist and technologist. Processes and equipment of chemical technologies]. Saint Petersburg, NPO Professional, 2006. P. 2. 916 p. (In Russ.)
4. Lapshin E. S., Shevchenko A. I. *Izuchenie kine-tiki razdeleniya po krupnosti i obezvozhivaniya mineral'nogo syr'ya pri vibroudarnom grohochenii* [Study of the kinetics of separation by size and dehydration of mineral raw materials during vibroimpact screening]. Zbagachennya korisnih kopalin: Nauk. tekhn. Zb., 2013; T. 53, no. 94: 179-188. (In Russ.)
5. Nadutyj V. P., Lapshin E. S., Shevchenko A. I. *Matematicheskoe modelirovanie vibroudarnogo dvizheniya proseivayushchej poverhnosti s uchetom dissipacii dlya povysheniya effektivnosti grohocheniya* [Mathematical modelling of vibroimpact motion of the sifting surface taking into account dissipation to increase the efficiency of screening]. *Vibracii v tekhnice i tekhnologiyah: Vseukr. nauchno-tekhn. Zhurnal*. 2012; 1(65):106-109. (In Russ.)
6. Nadutyj V.P., Lapshin E.S., Hmelenko I. P. *Analiz vibroudarnogo dvizheniya proseivayushchej poverhnosti grohota* [Analysis of vibroimpulse motion of the deck plate of screen]. *Vibracii v tekhnice i tekhnologiyah: Vseukr. nauchno-tekhn. Zhurnal*. 2009; 2(54): 69-72. (In Russ.)
7. Shevchenko G. A., Shevchenko V. G., Bobylev A. A. *Vibracionnye grohoty s polichastotnymi kolebaniyami proseivayushchih poverhnostej dlya tonkogo razdeleniya* [Vibrating screens with multi-frequency vibrations of sifting sur-faces for fine separation]. *Ugol' Ukrainy*. 2013: 2: 23-29. (In Russ.)

8. Evtukov S. A., Sizikov V.S. *Dinamika vzaimodejstviya rabochnih elementov vibroudarnogo grohota so sloem peremeshchaemogo materiala* [Dynamics of interaction of working elements of the vibroimpact screen with the layer of transported material]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; 4(51): 133-139. (In Russ.)

9. Skripilov A. P. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovaniya vibroudarnogo grohota dlya frakcionirovaniya peska* [Theoretical and experimental study of vibrating screen for sand fractionation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2013; 5: 188-193. (In Russ.)

10. Gursky V., Murashev S., Gogol R. Optimal synthesis of the impulsive resonant two-mass vibro-impact systems. Proceedings of III International scientific conference of young scientists Engineering mechanics & transport 2013 (EMT-2013). Lviv: Lviv Polytechnic publishing house. 2013, pp. 54-55.

11. Chelomej V.N. [and oth.] *Vibracii v tekhnike: spravochnik* [Vibration in engineering: handbook]. In 6 p. Red. soviet: V.N. Chelomej (chairman). Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. P.2. *Kolebaniya nelinejnyh mekhanicheskikh sistem* [Vibrations of nonlinear mechanical systems]. 351 p. (In Russ.)

12. Panovko Y.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to the theory of mechanical shock]. Moscow, Nauka, Gl. red. fiz. -mat. lit., 1977. 224 p. (In Russ.)

13. Krupenin V.L. *Prognozirovanie rezhimov dvizheniya vibroudarnykh sistem* [Prediction of motion regimes of vibroimpact systems]. *Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamika vibroudarnykh (sil'no nelinejnykh) sistem» DYVIS-2015, posvyashchennyj 100-letiyu so dnya rozhdeniya d.t.n., prof. A.E. Kobrinskogo* [Proceedings of the XVIII International Symposium "Dynamics of vibroimpact (highly nonlinear) systems" DYVIS-2015, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Doctor of Technical

Sciences, Prof. A.E. Kobrinsky]. Moscow, IMASH RAN, 2015: 140–148. (In Russ.)

14. Sizikov V.S. *Raschet parametrov grohota s vibroudarnym rezhimom kolebanij sita* [Calculation of screen parameters with vibroimpact regime of sieve oscillations]. SPb, NIPKB «Strojtekhnika», 2013. 102 p. Deposited in VINITI 25.11.13, № 329-B2013. (In Russ.)

15. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration problems in engineering]. Moscow, Nauka, Gl. red. fiz. -mat. lit., 1967. 444 p. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each coauthor contributed equally to the work on every stage of conducted theoretical research and to the creation the sections of present article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сизиков Валентин Станиславович – канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра «Технологии строительного производства».

Сизиков Станислав Анатольевич – канд. техн. наук, доц., генеральный директор.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin S. Sizikov – Cand. of Sci., Department of Construction Technology.

Stanislav A. Sizikov – Cand. of Sci., Associate Professor, Managing Director.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653>

EDN: HXNBME

Научная статья



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЯХ АНАЛИЗОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРАНСПОРТНОГО ОПРОСА

С. А. Аземша^{1*}, В. М. Морозов²¹Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель, Республика Беларусь²КУП «Горэлектротранспорт»,
г. Гомель, Республика Беларусьs-azemsha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>
vitaliy.m.morozov@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-7571-8867>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Транспорт в городах оказывает огромное влияние на экологию, качество жизни людей, их здоровье, безопасность дорожного движения и т. д., чему посвящено достаточно большое количество научных публикаций. Очевидно, что меры, направленные на смещение транспортного спроса с личного автомобиля в сторону использования общественного транспорта крайне актуальны. Одним из способов разработки таких мер может быть анкетирование пользователей транспортных услуг.

В данной статье выявляются закономерности в транспортных предпочтениях жителей г. Гомеля путем анализа результатов их транспортного опроса.

Цель работы – получение данных о транспортных предпочтениях жителей г. Гомеля.

Материалы и методы. При написании статьи использовались материалы, полученные при проведении транспортного опроса жителей г. Гомеля. При этом применялись методы графического анализа, таблицы кросстабуляции, критерий Хи-квадрат (при сравнении различий в независимых выборках номинальных переменных), дисперсионный анализ (при сравнении различий в независимых выборках номинальных и числовых переменных в зависимости от закона распределения внутри групп), реализованные в специализированном программном продукте.

Результаты. По результатам статьи получена информация о транспортных предпочтениях жителей г. Гомеля.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты анализа транспортного опроса являются основой для последующего обоснования мер, направленных на смещение транспортного спроса с индивидуальных автомобилей в сторону использования общественного транспорта регулярного сообщения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажир, общественный транспорт, анкетирование, причины, предложения, выборка, сравнение.

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 14.10. 2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Аземша С. А., Морозов В. М. Исследование закономерностей в транспортных предпочтениях анализом результатов транспортного опроса // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 638-653. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653>

© Аземша С. А., Морозов В. М., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653>
EDN: HXHBME

STUDY OF REGULARITIES IN TRANSPORT PREFERENCES BY ANALYSIS OF TRANSPORT SURVEY RESULTS

Sergei A. Azemsha^{1*}, Vitaly M. Marozau²

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus
KUP Gorelectrotransport,
Gomel, Republic of Belarus

s-azemsha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>
vitaliy.m.morozov@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-7571-8867>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Transport in cities has a huge impact on the environment, the quality of life of people, their health, road safety, etc., which is the subject of a fairly large number of scientific publications. It is obvious that measures aimed at shifting transport demand from a private car towards the use of public transport are extremely relevant. One way to develop such measures could be through a survey of users of transport services.

This article reveals patterns in the transport preferences of the inhabitants of the city of Gomel by analysing the results of their transport survey.

The purpose of the work is to obtain data on the transport preferences of the inhabitants of the city of Gomel.

Materials and methods. When writing the article, materials obtained during the transport survey of residents of the city of Gomel were used. At the same time, graphical analysis methods, crosstabulation tables, Chi-square test (when comparing differences in independent samples of nominal variables), analysis of variance (when comparing differences in independent samples of nominal and numerical variables, depending on the law distributions within groups) implemented in a specialised software product.

Results. Based on the results of the article, information was obtained about the transport preferences of the inhabitants of the city of Gomel.

Discussion and conclusion. The obtained results of the analysis of the transport survey are the basis for the subsequent justification of measures aimed at shifting transport demand from individual cars towards the use of regular public transport.

KEYWORDS: passenger, public transport, questioning, reasons, suggestions, selection, comparison.

The article was submitted 31.08.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Azemsha S. A., Marozau V. M. Study of regularities in transport preferences by analysis of transport survey results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 638-653. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653>

© Azemsha S. A., Marozau V. M., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт в городах оказывает огромное влияние на экологию, качество жизни людей, их здоровье, безопасность дорожного движения и т. д., чему посвящено достаточно большое количество научных публикаций. Ниже приведен краткий анализ некоторых из них.

Важность общественного транспорта в борьбе с загрязнением воздуха была оценена во время забастовок его работников в Барселоне, которые увеличили на 4,1–7,7% выбросы NOx [1] и на 14% концентрацию PM10 в Германии, что в свою очередь привело к увеличению количества госпитализаций на 11% по респираторным заболеваниям и 13% по патологиям дыхания, особенно у маленьких детей [2]. Исследование [3] показало, что открытие новой линии метро в Тайбэе понизило концентрацию содержания оксида углерода (CO) на 5–15%. Сравнительный анализ в Хьюстоне (Техас, США) показал, что после открытия легкорельсового транспорта (LRT) суточная смертность от инсульта снизилась на 30% в пределах 10 миль от LRT [4]. В Мехико через два года после внедрения системы скоростного автобуса (BRT) снизилась концентрация в воздухе CO на 5,5–7,2%, NOx на 4,7–6,5% и PM10 на 7,3–9,2% [5]. Аналогично внедрение BRT в Боготе показало снижение в воздухе содержания диоксида серы (SO2) на 43%, NOx на 18% и твердых частиц на 12% [6].

В работе [7] отмечается, что риск получить ранение в ДТП при пользовании общественным транспортом намного ниже, чем при пользовании индивидуальных механических транспортных средств, особенно двух- и трехколесных автомобилей. Сравнение данных на макроуровне в США показало, что в городах с большим количеством поездок на общественном транспорте уровень смертности в ДТП на душу населения на одну пятую ниже, чем в городах, зависящих от автомобилей. Также в таких городах пользование общественным транспортом на 1 милю проезда в общественном транспорте в 10 раз безопаснее, чем передвижение на такое же расстояние на автомобиле [8]. Исследования систем скоростного автобуса (BRT) TransMilenio в Боготе и Macrobus в Гвадалахаре, показали, что эти услуги привели к значительному повышению безопасности дорожного движения за счет снижения на 25–60% количества раненых и 38–100% количества погибших в ДТП [9]. Введение ночных автобусов в Израиле сократило

на 24% количество раненых в ДТП среди молодых граждан [10].

Много научных публикаций оценивают вклад общественного транспорта в повышение физической активности горожан. В работе [11] отмечено, что ВОЗ рекомендует для здоровья взрослого человека 150 мин физической активности средней интенсивности в неделю. В работе [12] отмечено, что замена личного автомобиля общественным транспортом добавляет физической активности за счет появления необходимости пеших передвижений до (от и между) остановочными пунктами. В исследовании [13] установлено, что при поездке на общественном транспорте граждане совершали на 1211 шагов больше, что эквивалентно дополнительным 10,2 мин умеренной физической активности, чем при использовании автомобилей. Также при этом на 60,8 ккал энергии расходовалось больше. При этом по времени поездки на общественном транспорте занимали всего на 11,7 мин дольше, чем поездки на личном моторизованном транспортном средстве. В работе [14] указано, что пассажиры, регулярно пользующиеся общественным транспортом, более чем в 3 раза чаще достигали рекомендованной нормы физической активности. В работе [15] эта цифра равна 2,23 раза. Также авторами установлено, что при спонсировании покупки проездного документа работодателем достижение рекомендаций по суточной физической активности возрастали более чем в пять раз. Авторы работы [16] установили, что у пассажиров общественного транспорта нормы суточной физической активности достигаются в 2,78 раз чаще, чем у пользователей личных автомобилей. В работе [17] оценено влияние общественного транспорта на пожилых граждан. Авторы установили, что у пожилых людей, которые чаще пользуются общественным транспортом, суточная физическая активность больше, чем у тех, кто пользуется личным автомобилем. Также у пользователей общественного транспорта реже наблюдалось ожирение. Аналогично и в работе [18] установлено, что мужчины, регулярно пользовавшиеся для трудовых передвижений общественным транспортом, на 35% реже страдали ожирением и избыточным весом. А в работе [19] эта цифра равна 28%. В работе [20] показано, что пользователи общественного транспорта имеют на 1,6–14 мин в день больше физической активности и более низкий индекс массы тела (26 против 27), чем пользователи индивидуальных автомобилей.

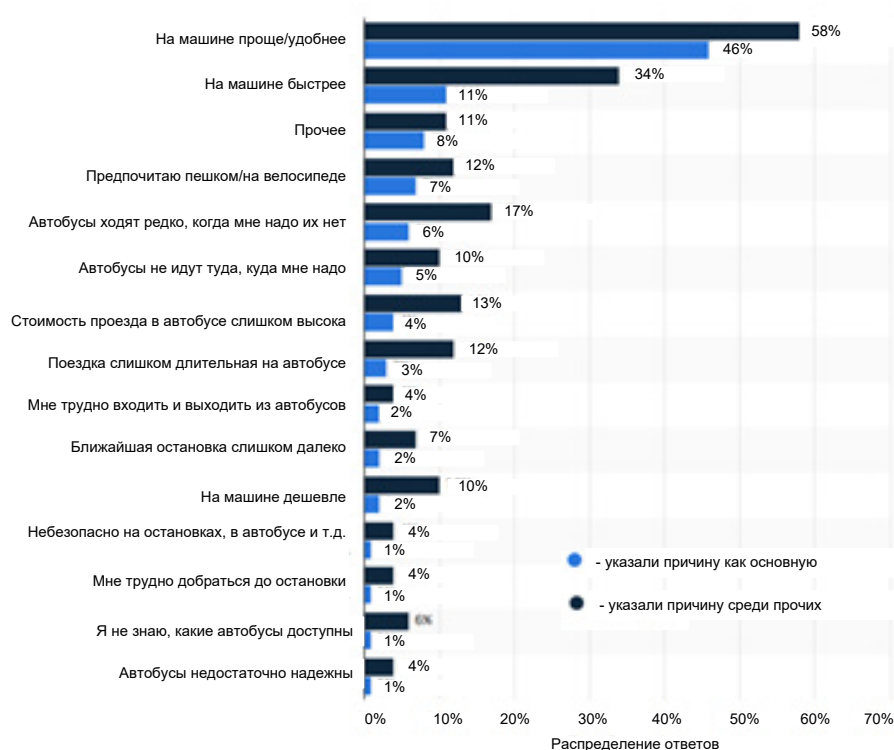


Рисунок 1 – Результаты опроса жителей Великобритании о причинах неиспользования / редкого использования автобусов
 Источник: Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/301128/reasons-people-don-t-travel-by-bus-more-in-the-united-kingdom>
 (дата обращения к ресурсу: 20.08.22)

Figure 1 – Results of a survey of UK residents on the reasons for non-use / rare use of buses
 Источник: Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/301128/reasons-people-don-t-travel-by-bus-more-in-the-united-kingdom>
 (accessed 20.08.22)

При таком влиянии общественного транспорта на жизнь горожан становится очевидно, что меры, направленные на смещение транспортного спроса с личного автомобиля в сторону использования общественного транспорта, крайне актуальны. Одним из способов разработки таких мер может быть анкетирование пользователей транспортных услуг.

В Великобритании в 2013 г. проводился опрос граждан, в котором задавался вопрос «Почему вы не используете / не пользуетесь чаще автобусами?»¹. Приняло участие в опросе 593 респондента. Респонденты могли выбрать одну основную и несколько допол-

нительных причин. Результаты такого опроса представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, основные причины неиспользования (редкого использования) автобусов связаны с низкими комфортом и скоростью.

В работе² приведены результаты схожего транспортного опроса. Респондентами выступали студенты местного университета. Их просили указать основную причину, из-за которой они не ездят в университет на общественном транспорте. Результаты опроса представлены на рисунке 2.

¹ Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/301128/reasons-people-don-t-travel-by-bus-more-in-the-united-kingdom> (дата обращения к ресурсу: 20.08.22).

² Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/301128/reasons-people-don-t-travel-by-bus-more-in-the-united-kingdom> (дата обращения к ресурсу: 20.08.22).



Рисунок 2 – Результаты опроса жителей Сиднея о причинах неиспользования / редкого использования автобусов [21]

Figure 2 – Results of a survey of Sydney residents on the reasons for non-use / rare use of buses [21]

Из рисунка 2 видно, что основные причины неиспользования общественного транспорта связаны с многолюдностью и малой скоростью, что согласуется с результатами, приведенными на рисунке 1.

В данной статье приводятся некоторые результаты анализа транспортного опроса, разработанного с учетом рекомендаций, изложенных в работе [22], а также на его основе исследуются закономерности в транспортных предпочтениях жителей г. Гомеля.

Цель работы – получение данных о транспортных предпочтениях жителей г. Гомеля.

Научная новизна заключается в использовании научного инструментария при анализе результатов транспортного опроса, проведенного во втором по величине городе Республики Беларусь, и выявлении закономерностей в транспортных предпочтениях его жителей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При анкетировании респондентам задавались общие вопросы, характеризующие пол респондента, его возраст, род занятости и уровень доходов. Также предлагалось дать ответы на следующие вопросы, описывающие транспортное поведение респондентов:

1. Есть ли у Вас в пользовании легковой автомобиль? На этот вопрос предлагалось 3 варианта ответа: нет, есть один, есть более одного.

2. Как часто Вы пользуетесь услугами общественного транспорта? Этот вопрос задавался респондентам, указавшим в первом вопросе варианты ответа «есть один» или «есть более одного». На этот вопрос предлагалось 4 варианта ответа: каждый день, почти каждый день, несколько раз в месяц, почти никогда. Респондентам, которые в первом вопросе ответили «нет», значение ответа на второй вопрос присваивалось «каждый день».

Таким образом, первые два вопроса делят жителей на две категории:

а) часто пользующиеся общественным транспортом. Сюда отнесены респонденты, у которых нет личного автомобиля, а также те, у кого есть личный автомобиль, но которые указали, что они пользуются общественным транспортом каждый день или почти каждый день;

б) редко пользующиеся общественным транспортом. Сюда отнесены респонденты, которые указали, что они пользуются общественным транспортом несколько раз в месяц или почти никогда не пользуются.

3. Почему Вы предпочитаете не использовать общественный транспорт для ежедневных передвижений? В качестве вариантов ответа на данный вопрос предлагалось выбрать любое количество из следующих причин: неудобно расположены остановочные пункты; долго ждать на остановке; низкая скорость поездки; много людей в салоне; жарко летом (холодно зимой); я считаю это ниже своего достоинства; невозможно добраться до конечной цели без пересадки; другое. В варианте ответа «Другое» респонденты могли указать любую иную причину, не вошедшую в список предлагаемых ответов. Анализ вариантов ответов, написанных респондентами в поле «Другое», позволили сгруппировать их в следующие укрупненные группы: «Все расположено в шаговой доступности», «Есть свой автомобиль», «Неудобно возить детей на учебу и в секции» и «Прочее», которые были добавлены к описанным выше и предлагаемым по умолчанию вариантам ответа. При этом предлагаемый по умолчанию вариант ответа «Я считаю это ниже своего достоинства» был выбран один раз и был переведен в категорию «Прочее».

4. Ваши предложения по улучшению работы транспортной системы города. Тут респонденты указывали конкретные или общие мероприятия, которые, по их мнению, должны улучшить работу транспортной системы города. Анализ таких предложений позволил обобщить их в следующие группы: все устраивает; выделение полос для общественного транспорта; кондиционеры летом/подогрев зимой; обновление/своевременный ремонт парка; оптимизация вместимости; оптимизация маршрутной сети; оптимизация расписания/интервалов движения; повышение скорости движения; прочее; реконструкция, строительство дорог, развязок, разноуровневых пешеходных переходов, карманов; соблюдение регулярности; совершенствование информационного обеспечения; совершенствование сбора платы за проезд; строительство метро/скоростной электрички; улучшение качества дорожного покрытия.

Предложения каждого респондента могли входить более чем в одну из перечисленных выше групп.

5. Каким видом общественного транспорта Вы чаще всего пользуетесь? Респонденты могли выбрать один из следующих трех вари-

антов ответа на данный вопрос: автобус; троллейбус; маршрутка.

6. Какой из показателей работы общественного транспорта на Ваш взгляд наиболее важный? В качестве ответа на данный вопрос предлагалось выбрать любое количество из следующих вариантов: безопасность поездки (с точки зрения нарушения водителем ПДД); наполняемость салона; скорость перевозки; стоимость поездки; удобство расположения остановочных пунктов; частота движения; профессионализм персонала; чистота и внешний вид транспортных средств; другое. В поле «Другое» респонденты могли указать любой иной фактор, не вошедший в список предлагаемых ответов. Анализ вариантов ответов, написанных респондентами в поле «Другое», позволил отнести их к одному или нескольким из восьми предложенных по умолчанию вариантов ответов.

7. Ваши предложения по улучшению качества работы общественного транспорта. Респонденты указывали конкретные или общие мероприятия, которые, по их мнению, должны улучшить работу транспортной системы города. Анализ таких предложений позволил обобщить их в следующие группы: все устраивает; выделение полос для общественного транспорта; кондиционеры летом/подогрев зимой; обновление/своевременный ремонт парка; оптимизация вместимости; оптимизация маршрутной сети; оптимизация расписания/интервалов движения; повышение скорости движения; прочее; реконструкция, строительство дорог, развязок, разноуровневых пешеходных переходов, карманов; соблюдение регулярности; совершенствование информационного обеспечения; совершенствование сбора платы за проезд; строительство метро/скоростной электрички; улучшение качества дорожного покрытия; профессионализм/культура водителей и кондукторов; чистота/внешний вид парка.

Вопросы 3 и 4 задавались респондентам, которые редко пользуются общественным транспортом, а 5–7 – часто пользуются общественным транспортом. Общее число респондентов 2860. Размер генеральной совокупности равен населению города и составляет 520 тыс. Величина доверительной вероятности принята 95%. Анкетирование проведено в июне 2022 г. путем предоставления бесповторной возможности ответа на вопросы анкеты, разработанные в google form.

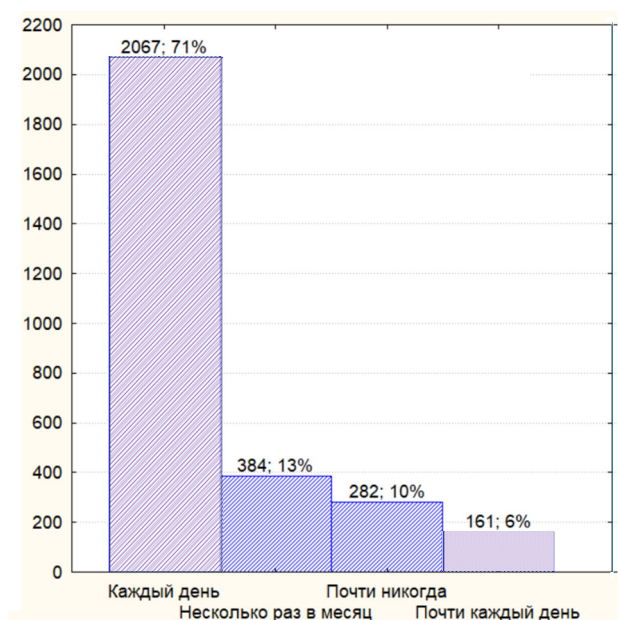


Рисунок 3 – Распределение ответов на вопрос о частоте пользования общественным транспортом
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of answers to the question about the frequency of using public transport
Source: compiled by the authors

При исследовании ответов на вопросы транспортной анкеты применялись:

- методы графического анализа – гистограммы распределения частот, круговые диаграммы, диаграммы размаха;
- таблицы кросстабуляции – для оценки распределения частот номинальных переменных, измеренных на одной группе объектов;
- критерий Хи-квадрат – для сравнения значимости различий в независимых выборках номинальных переменных;
- дисперсионный анализ – для сравнения значимости различий между независимыми непрерывными переменными, распределенными по нормальному закону распределения.

Использование указанных выше критериев и методов осуществлялось в работе³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 приведена гистограмма распределения ответов на вопрос «Как часто Вы пользуетесь услугами общественного транспорта?». Из рисунка 3 видно, что 77% опрошенных являются постоянными пользователями услуг общественного транспорта.

На рисунке 4 приведена гистограмма распределения ответов на вопрос «Почему Вы предпочитаете не использовать обществен-

ный транспорт для ежедневных передвижений?», который был задан тем, кто редко пользуется общественным транспортом. Всего было дано 1365 вариантов ответов на данный вопрос. Из рисунка 4 видно, что наиболее частыми причинами непользования общественным транспортом являются: много людей в салоне (20%), жарко летом/холодно зимой (20%), низкая скорость поездки (17%).

На рисунке 5 приведена гистограмма распределения ответов на вопрос «Ваши предложения по улучшению работы транспортной системы г. Гомеля?», который был задан тем, кто редко пользуется общественным транспортом. Из рисунка 5 видно, что данная категория респондентов наиболее часто предлагает оптимизацию маршрутной сети (27%) и оптимизацию расписания/интервалов движения (17%).

На рисунке 6 приведена гистограмма распределения ответов на вопрос «Какой из показателей работы общественного транспорта на Ваш взгляд наиболее важный?».

Из рисунка 6 видно, что 40% респондентов считают наиболее важным показателем работы общественного транспорта безопасность поездки. Вторым по частоте упоминания показателем является частота движения (31%).

³ Statistics 13.3. computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

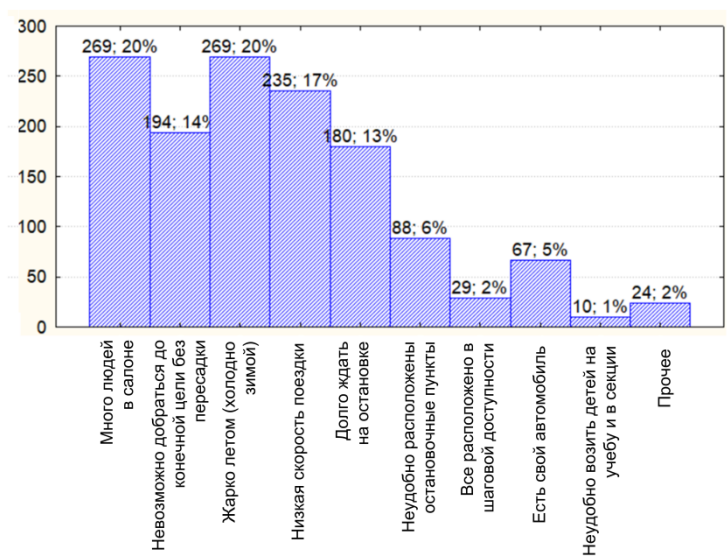


Рисунок 4 – Распределение причин неиспользования общественного транспорта для ежедневных перемещений
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Distribution of reasons for not using public transport for daily travel
Source: compiled by the authors.

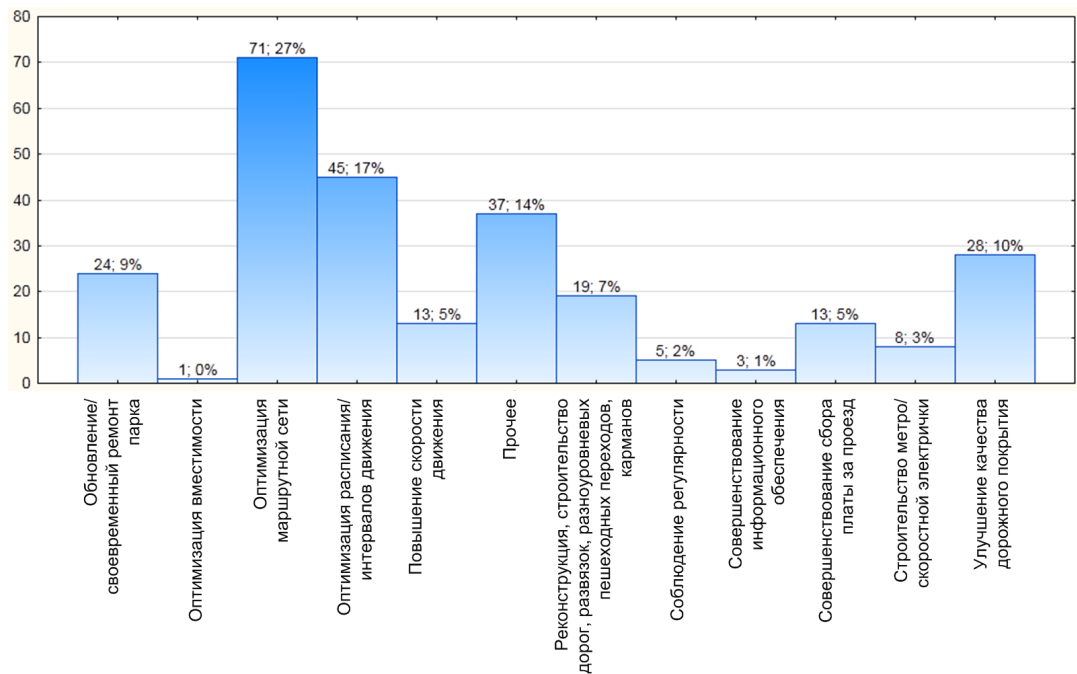


Рисунок 5 – Гистограмма распределения частот предложений по совершенствованию транспортной системы г. Гомеля респондентов, редко пользующихся общественным транспортом
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Histogram of frequency distribution of proposals for improving the transport system of the city of Gomel of respondents who rarely use public transport
Source: compiled by the authors.

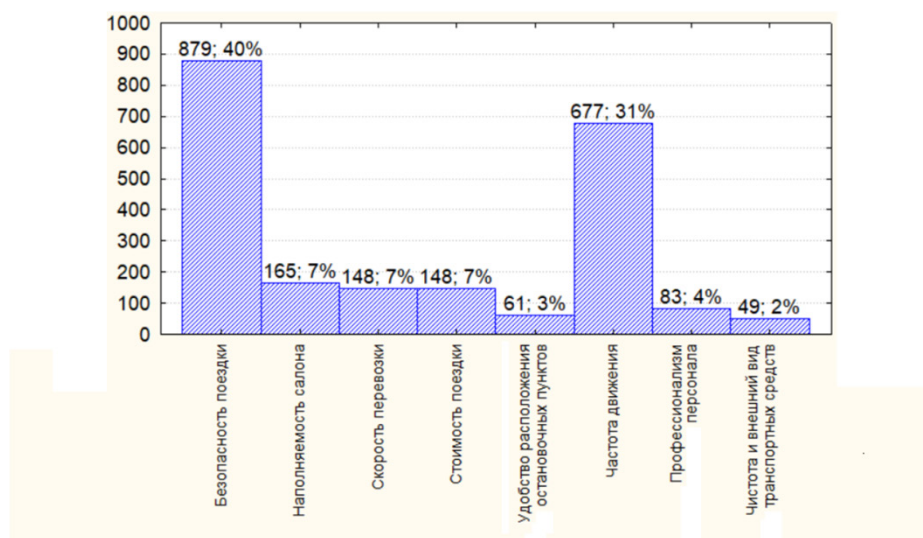


Рисунок 6 – Распределение ответов о наиболее важных показателях работы общественного транспорта среди тех, кто часто им пользуется
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Distribution of answers about the most important indicators of public transport performance among those who often use it
Source: compiled by the authors.

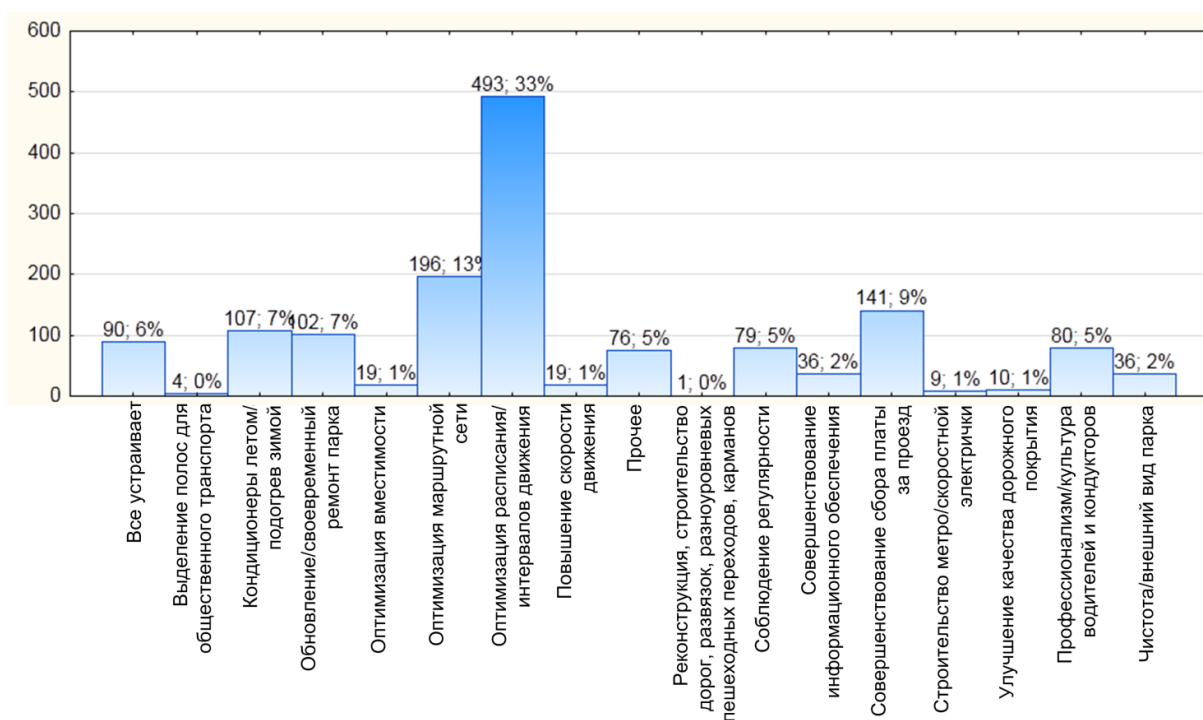


Рисунок 7 – Распределение предложений респондентов по вопросу улучшения качества работы общественного транспорта
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Distribution of respondents' proposals on the issue of improving the quality of public transport
Source: compiled by the authors.

На рисунке 7 приведена гистограмма распределения ответов на вопрос «Ваши предложения по улучшению качества работы общественного транспорта?». Этот вопрос задавался респондентам, которые часто пользуются общественным транспортом.

Из рисунка 7 видно, что треть предложений связано с оптимизацией расписания и интервалов движения, 13% – с оптимизацией маршрутной сети, 9% – с совершенствованием сбора платы за проезд.

Для оценки влияния номинальных характеристик респондентов (например, пол) над их

транспортными предпочтения, которые описываются также номинальными переменными (например, «Есть ли у Вас в пользовании легковой автомобиль?»), построены соответствующие круговые диаграммы (рисунок 8).

Из рисунка 8 видно, что мужчины чаще указывали, что у них в наличии есть один или более одного автомобиля, чем женщины. Оценить существенность влияния пола респондента на наличие у него автомобиля можно при помощи критерия Хи-квадрат, реализованного в работе [24]. Результаты такой оценки даны в таблице 1.



Рисунок 8 – Влияние пола респондента на наличие автомобиля
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Influence of respondent's gender on car ownership
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Фактические и ожидаемые частоты при оценке влияния
пола респондента на наличие автомобиля
Источник: составлено авторами.

Table 1
Actual and expected frequencies in assessing the impact
of respondent's gender on car ownership
Source: compiled by the authors.

Наименование таблицы	Пол	Наличие автомобиля			Итого по строке
		нет	есть один	есть более одного	
Фактические частоты	мужской	609	493	32	1134
	женский	1369	378	13	1760
	Все группы	1978	871	45	2894
Ожидаемые частоты	мужской	775,070	341,2972	17,63303	1134,000
	женский	1202,930	529,7028	27,36697	1760,000
	Все группы	1978,000	871,0000	45,00000	2894,000

Таблица 2

Распределение ответов о наличии автомобиля по группам в зависимости от пола респондентов
 Источник: составлено авторами.

Table 2

Distribution of answers about having a car by group according to the gender of the respondents
 Source: compiled by the authors.

Характеристика	Пол	Наличие автомобиля			Итого по строке
		нет	есть один	есть более одного	
Количество	мужской	609	493	32	1134
% по столбцу		30,79%	56,60%	71,11%	
% по строке		53,70%	43,47%	2,82%	
% по таблице		21,04%	17,04%	1,11%	39,18%
Количество	женский	1369	378	13	1760
% по столбцу		69,21%	43,40%	28,89%	
% по строке		77,78%	21,48%	0,74%	
% по таблице		47,30%	13,06%	0,45%	60,82%
Количество	Все группы	1978	871	45	2894
%		68,35%	30,10%	1,55%	

Для приведенного в таблице 1 примера Хи-квадрат равен 188,634, число степеней свободы 2, р-уровень близок к нулю, что говорит о том, что пол существенно влияет на наличие автомобиля. Для оценки количественного влияния в таких различиях была построена матрица сопряженности (таблица 2).

Из таблицы 2 можно сделать следующие выводы:

- количество женщин, не имеющих автомобиль, в два раза больше числа мужчин, у которых нет автомобиля;
- почти половина опрошенных мужчин указала, что у них в пользовании есть автомобиль.

При проведении аналогичного анализа между остальными группами номинальных переменных установлены следующие закономерности:

- 48,96% всех респондентов это женщины, которые ежедневно пользуются общественным транспортом;
- мужчинам присуще более редкое пользование общественным транспортом.
- более 50% пользующихся общественным транспортом каждый день это рабочие и служащие государственных учреждений;
- почти половина тех, кто пользуется общественным транспортом каждый день, это респонденты с низким уровнем доходов. С ростом доходов видны тенденции к предпочтению маршруток, а не автобусов и трол-

лейбусов. Дальнейшее увеличение доходов приводит к снижению частоты использования общественного транспорта;

- 2/3 респондентов не имеют в пользовании автомобиль и пользуются общественным транспортом каждый день;

- примерно треть респондентов, имеющих личный автомобиль, пользуются услугами общественного транспорта каждый день или почти каждый день;

- мужчины чаще используют троллейбус, чем женщины;

- порядка 40% часто пользующихся общественным транспортом указали наиболее важной его характеристикой безопасность движения, частоту движения;

- среди респондентов, часто пользующихся общественным транспортом, мужчины в три раза чаще указали предложение увеличить скорость, чем женщины, а женщины в 4 раза чаще предложили повысить профессионализм (культуру) водителей и кондукторов;

- среди пользователей общественного транспорта те, у кого выше доход, чаще указывали в качестве важнейших характеристик общественного транспорта наполняемость салона, частоту движения и скорость перевозки.

Для визуальной оценки наличия связи между возрастом респондентов и их транспортными предпочтениями, которые описываются номинальными переменными, использованы диаграммы размаха (рисунки 9).

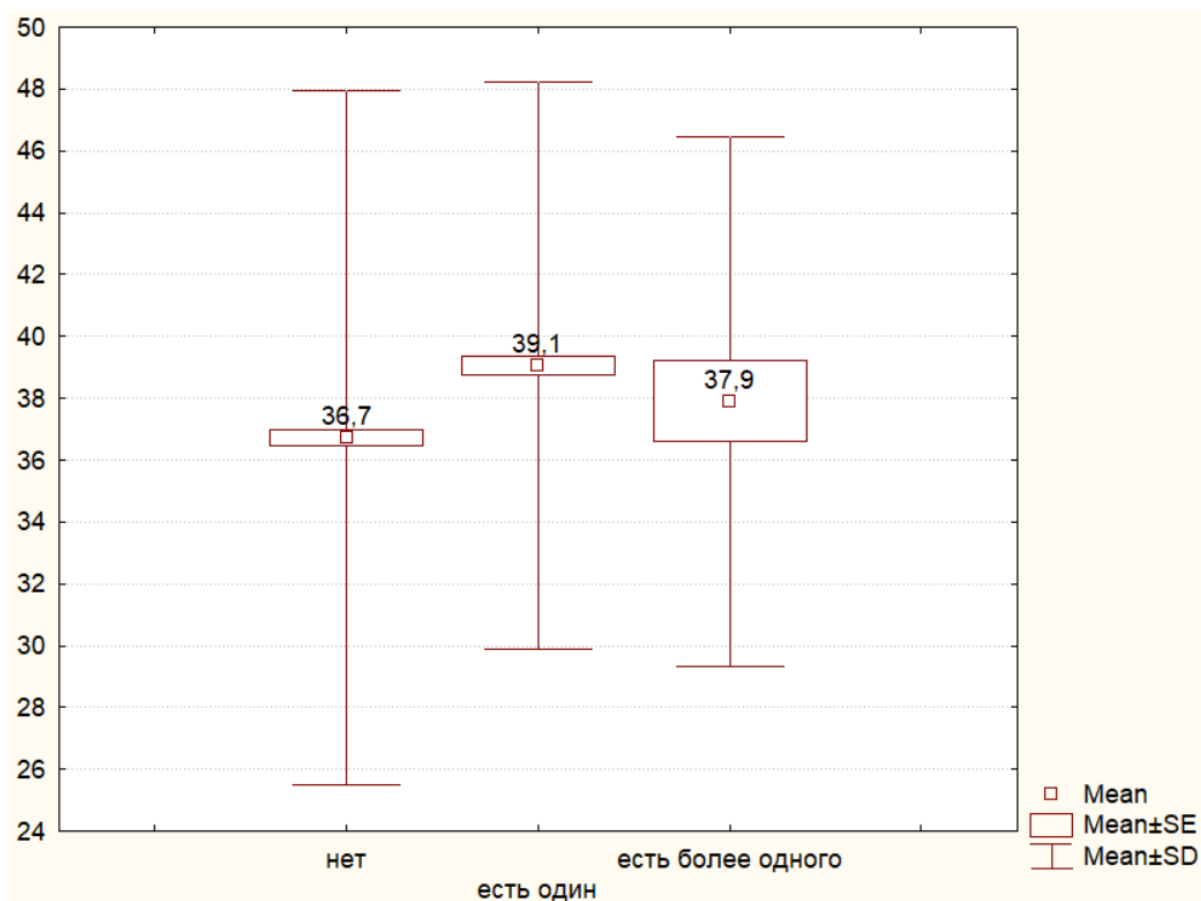


Рисунок 9 – Диаграмма размаха возраста респондентов при ответе на вопрос о наличии автомобиля
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Diagram of the age range of respondents when asked about having a car
Source: compiled by the authors.

Из рисунка 9 видно, что средний возраст респондента, в чьем распоряжении нет автомобиля – 36,7 лет, есть один автомобиль – 39,1, есть более одного – 37,9. Для оценки значимости различий возраста респондентов по рассматриваемым группам, а также различий внутри пар использовался дисперсионный анализ (рисунок 10).

Из рисунка 10 видно, что p -уровень меньше 0,05 и составляет 0,000001 (рисунок 10, а), что говорит о том, что в целом в трех группах респондентов имеются значимые различия по возрасту. На рисунке 10, а также приведены:

- F – критерий Фишера;
- $MS\ Error$ – среднеквадратическая ошибка;
- $df\ Error$ – ошибка числа степеней свободы;

- $SS\ Error$ – стандартная ошибка;
- $MS\ Effect$ – размер эффекта;
- $df\ Effect$ – число степеней свободы.

При этом значимыми оказались различия внутри пары вариантов ответов «есть один» и «нет» (соответствующие ячейки с p -уровнем меньше 0,05 выделены красным на рисунке 10, б).

При проведении аналогичного анализа между остальными номинальными переменными и числовой переменной «возраст» установлены следующие закономерности:

- чем старше возраст, тем реже пользуются общественным транспортом;
- возраст редко пользующихся общественным транспортом респондентов, чьи предложения касались охлаждения летом/подогрева зимой и обновления парка ниже, чем тех, кто высказывал другие предложения;

а

Analysis of Variance (Книга1)

Marked effects are significant at $p < .05000$

SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
	2	1631,029	325022,0	2884	112,6983	14,47252	0,000001

б

				Unequal N HSD; Variable: Укажите Ваш возраст			
				Marked differences are significant at $p < .05000$			
				{1}	{2}	{3}	
Есть ли у Вас в пользовании легковой автомобиль?				M=36,733	M=39,055	M=37,905	
нет {1}					0,000036	0,868494	
есть один {2}				0,000036		0,872913	
есть более одного {3}				0,868494	0,872913		

Рисунок 10 – Результаты дисперсионного анализа:

а – дисперсионный анализ для всех групп; б – анализ между парами групп

Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Results of the analysis of variance:

a – analysis of variance for all groups; b – analysis between pairs of groups

Source: compiled by the authors.

- более молодых пользователей общественного транспорта больше интересуют вопросы скорости и стоимости поездки, а более возрастных – вопросы безопасности и профессионализма персонала;

- по предложениям развития общественного транспорта категория молодых респондентов чаще предлагали обустройство выделенных полос для общественного транспорта и мероприятия по повышению скорости движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной статье отмечена важность общественного транспорта в жизни городов, качестве жизни граждан и в связи с этим – необходимость смещения транспортного спроса с использования личного автомобиля к поездкам на общественном транспорте. Для разработки мероприятий, направленных на достижение такой цели, было проведено анкетирование жителей, результаты которого позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1) 77% опрошенных являются постоянными пользователями услуг общественного транспорта, что подразумевает разработку мер, направленных на то, чтобы они не стали пользователями личных автомобилей. Для этого стоит учитывать, что 40% таких респондентов считают самым важным показателем работы общественного транспорта безопасность поездки и частоту движения (31%). Кро-

ме того, треть предложений от них связано с оптимизацией расписания и интервалов движения, 13% – с оптимизацией маршрутной сети, 9% – с совершенствованием сбора платы за проезд. Также более молодых пользователей общественного транспорта больше интересуют вопросы скорости и стоимости поездки, а более возрастных – вопросы безопасности и профессионализма персонала. Кроме того, по предложениям развития общественного транспорта категория молодых респондентов чаще предлагали обустройство выделенных полос для общественного транспорта и мероприятия по повышению скорости движения.

2) 23% опрошенных редко пользуются услугами общественного транспорта, что подразумевает разработку мер, направленных на смещение их транспортного спроса в сторону увеличения использования общественного транспорта. При этом стоит учитывать, что наиболее частыми причинами редкого пользования общественным транспортом является: много людей в салоне (20%), жарко летом/холодно зимой (20%), низкая скорость поездки (17%). Кроме того, данная категория респондентов наиболее часто предлагает оптимизацию маршрутной сети (27%) и оптимизацию расписания/интервалов движения (17%). По половому признаку в данную категорию чаще попадают мужчины. Перегруженность салона указывалась как причина редкого использования общественного транспорта 40% респондентов, редко пользующихся общественным

транспортом. Практически аналогичный процент по вопросу кондиционирования (отопления салона), долгого времени ожидания на остановке и низкой скорости поездки.

Также было установлено, что повышение доходов и возраста респондентов ведут к смещению спроса с общественного транспорта в сторону использования индивидуального автомобиля.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен анализ некоторых результатов транспортного опроса населения жителей г. Гомеля и полученных на его основе закономерностей транспортного поведения. Эта информация может стать законной основой для разработки мер, направленных на смещение транспортного спроса в сторону использования общественного транспорта.

Дальнейшие направления исследований в данной области видятся в получении нетривиальной информации из результатов проведенного транспортного опроса методами интеллектуального анализа данных, ее систематизации с учетом знаний, полученных в данной статье, и разработке на этой основе мер, направленных на смещение транспортного спроса в сторону использования общественного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Basagaña, X., Triguero-Mas, M., Agis, D., Pérez, N., Reche, C., Alastuey, A., et al., 2018. Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Sci. Total Environ.* 610–611, 1076–1082. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.263>.
2. Bauernschuster, S., Hener, T., Rainer, H., 2017. When labor disputes bring cities to a standstill: the impact of public transit strikes on traffic, accidents, air pollution, and health. *Am. Econ. J. Econ. Policy* 9, 1–37. Available from: <https://doi.org/10.1257/pol.20150414>.
3. Chen, Y., Whalley, A., 2012. Green infrastructure: the effects of urban rail transit on air quality. *Am. Econ. J. Econ. Policy* 4, 58–97. Available from: <https://doi.org/10.1257/pol.4.1.58>.
4. Park, E.S., Sener, I.N., 2017. Impact of light rail transit on traffic-related pollution and stroke mortality. *Int. J. Public. Health* 62, 721–728. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00038-017-0967-4>.
5. Bel, G., Holst, M., 2018. Evaluation of the impact of bus rapid transit on air pollution in Mexico City. *Transp. Policy* 63, 209–220. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.001>.
6. Turner, M., Kooshian, C., Winkelman, S., 2012. Colombia's Bus Rapid Transit (BRT) Development and Expansion: A Case Study of Barriers and Critical Enablers of Colombia's BRT Systems.
7. WHO, 2018. Global Status Report on Road Safety 2018. Geneva. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>.
8. APTA, 2016. The Hidden Traffic Safety Solution: Public Transportation.
9. Carrigan, A., King, R., Velasquez, J.M., Raifman, M., Duduta, N., 2013. Social, Environmental and Economic Impacts of BRT Systems: Bus Rapid Transit Case Studies From Around the World. EMBARQ, World Resour. Inst.
10. Lichtman-Sadot, S., 2019. Can public transportation reduce accidents? Evidence from the introduction of late-night buses in Israeli cities. *Reg. Sci. Urban. Econ.* 74, 99–117. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2018.11.009>.
11. WHO, 2010. Global Recommendations on Physical Activity for Health. Geneva.
12. Besser, L.M., Dannenberg, A.L., 2005. Walking to public transit. *Am. J. Prev. Med.* 29, 273–280. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ampre.2005.06.010>.
13. Chaix, B., Kestens, Y., Duncan, S., Merrien, C., Thierry, B., Pannier, B., et al., 2014. Active transportation and public transportation use to achieve physical activity recommendations? A combined GPS, accelerometer, and mobility survey study. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 11, 1–11. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12966-014-0124-x>.
14. Lachapelle, U., Frank, L., Saelens, B.E., Sallis, J.F., Conway, T.L., 2011. Commuting by public transit and physical activity: where you live, where you work, and how you get there. *J. Phys. Act. Health* 8 (Suppl 1). Available from: <https://doi.org/10.1123/jpah.8.s1.s72>.
15. Lachapelle, U., Noland, R.B., 2012. Does the commute mode affect the frequency of walking behavior? The public transit link. *Transp. Policy* 21, 26–36. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.008>.
16. Lachapelle, U., Pinto, D.G., 2016. Longer or more frequent walks: examining the relationship between transit use and active transportation in Canada. *J. Transp. Heal.* 3, 173–180. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.02.005>.
17. Lavery, A.A., Webb, E., Vamos, E.P., Millett, C., 2018. Associations of increases in public transport use with physical activity and adiposity in older adults. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 15, 1–10. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12966-018-0660-x>.
18. Wen, L.M., Rissel, C., 2008. Inverse associations between cycling to work, public transport, and overweight and obesity: findings from a population based study in Australia. *Prev. Med. (Baltim.)* 46, 29–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.08.009>.
19. Lindström, M., 2008. Means of transportation to work and overweight and obesity: a population-based study in southern Sweden. *Prev. Med. (Baltim.)* 46, 22–28. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.07.012>.
20. Saelens, B.E., Moudon, A.V., Kang, B., Hurvitz, P.M., Zhou, C., 2014. Relation between higher physical activity and public transit use. *Am. J. Public. Health* 104, 854–859. Available from: <https://doi.org/10.2105/AJPH.2013.301696>.

21. Tirachini, Alejandro. (2020). Las promesas del transporte público automatizado. 10.13140/RG.2.2.29877.01769.

22. Аземша С. А., Морозов В. М. Разработка предложений по анкетированию пассажиров городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // Вестник СибАДИ. 2022; 19(3):344–357. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-344-357>.

REFERENCES

1. Basagaña, X., Triguero-Mas, M., Agis, D., Pérez, N., Reche, C., Alastuey, A., et al., 2018. Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Sci. Total Environ.* 610–611, 1076–1082. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.263>.

2. Bauernschuster, S., Hener, T., Rainer, H., 2017. When labor disputes bring cities to a standstill: the impact of public transit strikes on traffic, accidents, air pollution, and health. *Am. Econ. J. Econ. Policy* 9, 1–37. Available from: <https://doi.org/10.1257/pol.20150414>.

3. Chen, Y., Whalley, A., 2012. Green infrastructure: the effects of urban rail transit on air quality. *Am. Econ. J. Econ. Policy* 4, 58–97. Available from: <https://doi.org/10.1257/pol.4.1.58>.

4. Park, E.S., Sener, I.N., 2017. Impact of light rail transit on traffic-related pollution and stroke mortality. *Int. J. Public. Health* 62, 721–728. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00038-017-0967-4>.

5. Bel, G., Holst, M., 2018. Evaluation of the impact of bus rapid transit on air pollution in Mexico City. *Transp. Policy* 63, 209–220. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.001>.

6. Turner, M., Kooshian, C., Winkelman, S., 2012. Colombia's Bus Rapid Transit (BRT) Development and Expansion: A Case Study of Barriers and Critical Enablers of Colombia's BRT Systems.

7. WHO, 2018. Global Status Report on Road Safety 2018. Geneva. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>.

8. APTA, 2016. The Hidden Traffic Safety Solution: Public Transportation.

9. Carrigan, A., King, R., Velasquez, J.M., Raifman, M., Duduta, N., 2013. Social, Environmental and Economic Impacts of BRT Systems: Bus Rapid Transit Case Studies From Around the World. *EMBARQ, World Resour. Inst.*

10. Lichtman-Sadot, S., 2019. Can public transportation reduce accidents? Evidence from the introduction of late-night buses in Israeli cities. *Reg. Sci. Urban. Econ.* 74, 99–117. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2018.11.009>.

11. WHO, 2010. Global Recommendations on Physical Activity for Health. Geneva.

12. Besser, L.M., Dannenberg, A.L., 2005. Walking to public transit. *Am. J. Prev. Med.* 29, 273–280. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2005.06.010>.

13. Chaix, B., Kestens, Y., Duncan, S., Merrien, C., Thierry, B., Pannier, B., et al., 2014. Active transportation and public transportation use to achieve physi-

cal activity recommendations? A combined GPS, accelerometer, and mobility survey study. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 11, 1–11. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12966-014-0124-x>.

14. Lachapelle, U., Frank, L., Saelens, B.E., Sallis, J.F., Conway, T.L., 2011. Commuting by public transit and physical activity: where you live, where you work, and how you get there. *J. Phys. Act. Health* 8 (Suppl 1). Available from: <https://doi.org/10.1123/jpah.8.s1.s72>.

15. Lachapelle, U., Noland, R.B., 2012. Does the commute mode affect the frequency of walking behavior? The public transit link. *Transp. Policy* 21, 26–36. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.008>.

16. Lachapelle, U., Pinto, D.G., 2016. Longer or more frequent walks: examining the relationship between transit use and active transportation in Canada. *J. Transp. Heal.* 3, 173–180. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.02.005>.

17. Laverty, A.A., Webb, E., Vamos, E.P., Millett, C., 2018. Associations of increases in public transport use with physical activity and adiposity in older adults. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 15, 1–10. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12966-018-0660-x>.

18. Wen, L.M., Rissel, C., 2008. Inverse associations between cycling to work, public transport, and overweight and obesity: findings from a population based study in Australia. *Prev. Med. (Baltim.)* 46, 29–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.08.009>.

19. Lindström, M., 2008. Means of transportation to work and overweight and obesity: a population-based study in southern Sweden. *Prev. Med. (Baltim.)* 46, 22–28. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.07.012>.

20. Saelens, B.E., Moudon, A.V., Kang, B., Hurvitz, P.M., Zhou, C., 2014. Relation between higher physical activity and public transit use. *Am. J. Public. Health* 104, 854–859. Available from: <https://doi.org/10.2105/AJPH.2013.301696>.

21. Tirachini, Alejandro. (2020). Las promesas del transporte público automatizado. 10.13140/RG.2.2.29877.01769.

22. Azemsha S.A., Morozov V.M. Development of proposals on passenger questionnaires for regular urban passenger transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022;19(3):344-357. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-344-357>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аземша С. А. Постановка цели и задачи исследования, подбор и анализ литературы. Анализ результатов исследований, их обобщение и обоснование выводов. Выявление актуальных вопросов и рекомендаций для обоснования мероприятий по повышению привлекательности общественного транспорта.

Морозов В. М. Систематизация результатов транспортного анкетирования, предоставление полученных в ходе транспортного опроса данных в удобной для обработки форме. Графический

анализ результатов анкетирования, сравнение различий в группах при помощи статистических критериев.

COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Sergei A. Azemsha. Statement of the purpose and objectives of the study, selection and analysis of literature. Analysis of research results, their generalisation and substantiation of conclusions. Identification of topical issues and recommendations to justify measures to increase the attractiveness of public transport.

Vitaly M. Marozau. Systematisation of the results of the transport survey, providing the data obtained during the transport survey in a form convenient for processing. Graphical analysis of the results of the survey, comparison of differences in groups using statistical criteria.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением».

Морозов Виталий Михайлович – директор коммунального унитарного предприятия «Горэлектротранспорт».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei A. Azemsha – Cand. of Sci., Associate Professor, the Head of the Road Transport and Traffic Management Department.

Vitaly M. Marozau – Director of the Gorelectrotransport municipal unitary enterprise.

УДК 656.121
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-654-665>
EDN: ICLCBT
Научная статья



МЕТОДИКА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А. А. Гуськов*, Н. Ю. Залукаева, М. А. Севостьянов
Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия
tyoma-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2146-3712>
natashazalukaeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6415-5816>
port4554@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7569-5420>
*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается проблематика организации городских пассажирских перевозок. Исследуются причины неэффективной работы общественного транспорта в городах России и за рубежом, а также факторы, способствующие этому. Указывается на недостаточный уровень использования в перевозочном процессе информационно-технологических систем и технологий. Цель работы: создание уточнённой методики оценки эффективности работы общественного пассажирского транспорта на основе критериев информационно-технологического показателя, а также апробация оценки эффективности работы автотранспортных предприятий, занимающихся перевозкой пассажиров в г. Тамбове по данному показателю.

Материалы и методы. Разработана уточнённая методика оценки эффективности работы общественного пассажирского транспорта на основе критериев информационно-технологического показателя. Каждому критерию был присвоен весовой показатель (коэффициент) в зависимости от значимости и влияния на эффективность и безопасность работы общественного пассажирского транспорта.

Результаты. Исследование эффективности работы общественного пассажирского транспорта г. Тамбова по критериям информационно-технологической оценки показало, что в целом уровень оснащённости ниже среднего оценочного показателя – от 5,55 до 8,3 балла. Это свидетельствует о недостаточной оснащённости перевозчиков информационными технологиями и системами.

Обсуждение и заключение. Предложены мероприятия, позволяющие повысить эффективность работы общественного пассажирского транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирские перевозки, городской общественный транспорт, автобус, информационные технологии, оценка эффективности.

Статья поступила в редакцию 23.08.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Гуськов А. А., Залукаева Н. Ю., Севостьянов М. А. Методика информационно-технологической оценки работы общественного пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 654-665. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-654-665>

© Гуськов А. А., Залукаева Н. Ю., Севостьянов М. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-654-665>
EDN: ICLCBT

METHODOLOGY FOR INFORMATION AND TECHNOLOGY ASSESSMENT OF PUBLIC PASSENGER TRANSPORT WORK

Artem A. Guskov*, **Natalia Y. Zalukaeva**, **Maxim Al. Sevostyanov**
Tambov State Technical University, Tambov, Russia
tyoma-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2146-3712>
natashazalukaeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6415-5816>
port4554@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7569-5420>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The problems of the organisation of urban passenger transportation are considered. The reasons for the inefficient operation of public transport in the cities of Russia and abroad, as well as the factors contributing to this, are investigated. The insufficient level of information technology systems and technologies use in the transportation process is indicated. The purpose of the work is to develop a refined methodology for evaluating the efficiency of public passenger transport based on the criteria of the information technology indicator, as well as to test the evaluation of the efficiency of motor transport enterprises engaged in passengers transportation in Tambov according to this indicator.

Materials and methods. A refined methodology for evaluating the efficiency of public passenger transport has been developed based on the criteria of the information technology indicator. Each criterion was assigned a weighting indicator (coefficient), depending on the significance and impact on the efficiency and safety of public passenger transport.

Results. The study of the efficiency of public passenger transport in Tambov according to the criteria of information technology assessment showed that, in general, the level of equipment is lower than the average estimated indicator - from 5.55 to 8.3 points. This indicates the insufficient equipment of carriers with information technologies and systems.

Discussion and conclusion. The measures to improve the efficiency of public passenger transport are proposed.

KEYWORDS: passenger transportation, urban public transport, bus, information technology, efficiency assessment.

The article was submitted 23.08.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Guskov Artem A., Zalukaeva Natalia Y., Sevostyanov Maxim Al. Methodology for information and technology assessment of public passenger transport work. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 654-665. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-654-665>

© Guskov A. A., Zalukaeva N. Y., Sevostyanov M. Al., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Общественный пассажирский транспорт оказывает существенное влияние на формирование и развитие экономического потенциала того региона, частью которого является. Улучшение методов организации перевозочного процесса пассажиров будет положительно влиять на уровень жизни населения и степень развития городского хозяйства [1, 2].

Общественный транспорт наиболее привлекателен и эффективен для потребителей, когда его работа спланирована и функционирует как единая интегрированная система [3]. Это особенно важно в городских условиях в быстрорастущих темпах экономики, где общественный транспорт должен всё больше конкурировать с личным транспортом, который предлагает проезд «от двери до двери» независимо от времени суток или дня недели. Международный опыт показывает [4, 5], что специалисты по планированию работы общественного транспорта должны учитывать два аспекта интеграции:

- интеграцию всех видов транспорта и маршрутов, составляющих мультимодальную сеть общественного транспорта;
- интеграцию физических и эксплуатационных элементов каждого соответствующего вида транспорта и услуги, например, метро или автобуса.

Успешная интеграция в обоих измерениях обеспечит для пассажиров повышение удобства и качества предоставляемых услуг, а также сделает работу общественного транспорта более эффективной и экономичной [6, 7]. Это поможет максимизировать пассажиропоток и доходы общественного транспорта, повысить удовлетворённость пассажиров, снизить затраты, а также обеспечить экологические, социальные и экономические выгоды для инвестиций [8, 9, 10, 11].

Обеспечение безопасности общественного пассажирского транспорта является важной целью в рамках повышения эффективности работы всей транспортной системы [12]. Рассматриваемую проблему необходимо решить при условии, что будет уделено должное внимание стратегиям и мерам по предотвращению травматизма, т. е. пассивной безопасности транспортных средств. Процесс производства новых транспортных средств должен адаптироваться к всё более строгим экологическим требованиям, но в то же время произведе-

ли обязаны обеспечивать основные требования к безопасности и комфорту транспортных средств [13, 14, 15].

Системы предупреждения и предотвращения столкновений, камеры и датчики слепых зон, помощь в удержании полосы движения, предупреждение о выезде с полосы движения и адаптивный круиз-контроль являются примерами установленных функций, которые помогают водителям автобусов и автоматизируют определенные задачи вождения, делая его более безопасным и лёгким [16, 17, 18].

Развитие электронно-вычислительной техники позволяет формировать большие объёмы данных в ходе исследования работы транспортных предприятий и уровней взаимодействия с другими субъектами транспортной инфраструктуры. Использование этих данных помогает лучшим образом решать проблемы развития маршрутной сети городов. Также современные технологии позволяют контролировать работу водителей на маршруте и отмечать:

- фактическое время нахождения транспортного средства на маршруте;
- отслеживать регулярность движения;
- сходы по техническим причинам;
- срывы рейсов с указанием причин (нарушение схемы движения или движение не в соответствии с установленным расписанием);
- нарушение правил дорожного движения.

Эффективность пассажирских перевозок является достаточно сложным понятием, может быть оценена с нескольких точек зрения и относительно всего пассажирского транспорта или же отдельных составляющих [19, 20]. Научные исследователи в этой сфере дают разные определения этому термину.

Под эффективностью использования общественного пассажирского транспорта понимают осуществление перевозок с наименьшими материальными и трудовыми затратами. Авторы данного определения¹ приравнивают наиболее эффективное использование подвижного состава и всю систему перевозок. Основная задача – это достижение минимальных эксплуатационных затрат при организации движения с максимальной загрузкой транспортных средств. Техничко-эксплуатационные показатели должны быть приближены к своим максимальным значениям. Такой односторонний подход может не учитывать комфортные условия для пассажира, но отдача от затраченных ресурсов перевозчика будет максимальной.

¹ Громов Н. Н., Персианов В. А. Управление на транспорте: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1990. 336 с.

Эффективность системы общественного пассажирского транспорта определяется соотношением полезного результата работы (экономический и социальный эффект) по перевозке пассажиров и затраченных на ее осуществление средств (финансовых, материальных, трудовых, временных и т. д.)

Такой подход в оценке является более комплексным и затрагивает не только технические аспекты работы транспорта, но также экономические, социальные и природно-экологические [21].

Авторы работы [22], рассматривая оценку эффективности общественного пассажирского транспорта, отмечают, что в основе лежит социальный характер, который зависит от следующих показателей:

- технико-экономических;
- технико-эксплуатационных;
- организационно-технических;
- производственно-бытовых;
- санитарно-гигиенических;
- качества обслуживания пассажиров.

Схожий подход отмечается у авторов², которые ссылаются на необходимость оценки работы общественного транспорта не только по техническим показателям, но и по экономическим и социальным аспектам.

Сложность точного определения эффективности заключается в том, что достаточно сложно вычислить положительный эффект от ряда мероприятий, направленных на повышение качества пассажирских перевозок. Применение новых экологических стандартов также редко позволяет получить исчислимую выгоду.

Оценивая эффективность и качество работы общественного пассажирского транспорта со стороны пассажира, необходимо выделить четыре пункта, по которым можно построить базовую модель оценки [23]:

- приемлемый уровень безопасности поездки;
- скорость передвижения;
- удобство и комфорт поездки;
- доступная стоимость поездки.

Оценить уровень безопасности поездки можно с помощью официальной статистики дорожно-транспортных происшествий с участием пассажирского транспорта. Такие данные включают в себя также количество пострадавших. Более детальное исследование предполагает сравнение разных временных промежутков и выявление динамики событий.

Одним из способов оптимизации движения на дорогах общего пользования является система «Умный светофор». Основная функция системы – повышение пропускной способности перекрёстков с помощью динамического управления сигналами светофора. Автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД) состоит из компонентов, которые помогают координировать движение на дорогах. В состав системы входят контроллеры, датчики движения, камеры и центральный сервер, в котором производятся вычисления и через который в автоматическом режиме вносятся изменения в сигналы светофора [24, 25]. Достоинством системы «Умный светофор» является возможность отдавать приоритет движения определённым транспортным средствам, например, общественному транспорту [26]. Это эффективный способ повысить среднюю скорость движения общественного пассажирского транспорта, что повысит привлекательность данного типа передвижения для пассажиров. Система «Умный светофор» не способна компенсировать полностью возникающие проблемы с дорожными заторами, но может существенно повысить эффективность движения транспорта в городах.

Приведённые выше исследования авторов показывают наличие многочисленных проблем организации городских пассажирских перевозок. Сформированная на сегодняшний день городская застройка и в большей части инфраструктура не соответствуют количеству автотранспортных средств, уровню и качеству обеспеченности перевозками общественного пассажирского транспорта. Во многих городах России просматривается отсутствие достаточного финансирования на реализацию проектов улучшения организации работы общественного транспорта. Авторами исследований в их работах очень слабо рассматриваются проблемы, которые могли бы быть решены с внедрением информационно-технологических систем и технологий.

Целью работы является разработка уточнённой методики оценки эффективности работы общественного пассажирского транспорта на основе критериев информационно-технологического показателя, а также апробация оценки эффективности работы автотранспортных предприятий, занимающихся перевозкой пассажиров в г. Тамбове по данному показателю.

² Громов Н. Н., Бурханов В. Ф., Чудновский А. Д. Транспортное обслуживание северных районов СССР. М.: Транспорт, 1982. 104 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности работы общественного пассажирского транспорта была создана уточнённая методика на основе критериев с точки зрения информационно-технологического подхода. Данный подход подразумевает использование в сфере общественного пассажирского транспорта современных информационных технологий, которые позволяют получать информацию нового качества для принятия обоснованных управленческих решений посредством переработки первичных данных о перевозках пассажиров и использовании подвижного состава³.

Был определён перечень критериев оценки информационно-технологического показателя, которые сгруппированы по подгруппам в зависимости от степени влияния на уровень работы общественного пассажирского транспорта (таблица 1). Критериям в каждой группе присвоено различное количество мак-

симальных баллов (от 1 до 3). Это обосновывается следующим. К примеру, применение интеллектуальной транспортной системы (ИТС) в городе позволит моделировать транспортные системы, регулировать транспортные и пешеходные потоки, обеспечить большую информативность и безопасность. Использование ИТС позволит значительно улучшить работу всего общественного пассажирского транспорта города, поэтому данный критерий имеет наивысший максимальный балл из возможных – 3. Внедрение автоматического контроля уровня расхода топлива (подгруппа с максимальным баллом – 1) позволит лишь оптимизировать расход топлива транспортного средства, практически не влияя на процесс организации перевозок пассажиров. Включение конкретных критериев в информационно-технологический показатель обосновывается проведёнными авторами теоретическими исследованиями, описанными выше.

Таблица 1
Весовые показатели критериев, отражающих уровень информационно-технологического развития общественного пассажирского транспорта
Источник: составлено авторами.

Table 1
Weight indicators of criteria reflecting the level of information technology development of public passenger transport
Source: compiled by the authors.

Наименование критерия оценки информационно-технологического показателя	Количество баллов
Элементы системы, оцениваемые одним баллом	
Автоматический контроль уровня расхода топлива	0–1
Автоматическое отслеживание оставшегося пробега до следующего планового технического обслуживания подвижного состава	0–1
Автоматический подсчёт рабочих часов водителя	0–1
Автоматический расчёт планового прибытия транспортного средства на остановочный пункт	0–1
Наличие технических средств для сообщения о чрезвычайных ситуациях	0–1
Применение автоматических и полуавтоматических систем помощи водителю в управлении транспортным средством	0–1
Автоматические системы для очистки воздуха для лучших санитарных условий	0–1
Электронный документооборот при организации перевозочного процесса	0–1
Применение систем видеонаблюдения для обеспечения транспортной безопасности	0–1
Элементы системы, оцениваемые двумя баллами	
Автоматизированная система оплаты проезда без участия водителя и (или) кондуктора (водитель полностью нацелен на управление транспортным средством)	0–2
Элементы системы, оцениваемые тремя баллами	
Использование ИТС для повышения средней скорости движения общественного транспорта	0–3
Наличие системы автоматического подсчёта пассажиропотока	0–3
Итоговое количество баллов	0–16

³ Гвоздева В. А. Базовые и прикладные информационные технологии: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим специальностям. Москва: Форум: ИНФРА-М, 2014. 382 с.

Апробирование методики оценки уровня информационно-технологического развития общественного пассажирского транспорта производилось на примере г. Тамбова. Для этого были выбраны три автотранспортных предприятия из перечня всех перевозчиков в г. Тамбове, занимающиеся перевозкой пассажиров общественным транспортом. Выбор осуществлялся по следующим критериям:

- количество маршрутов перевозки пассажиров – не менее 3;
- количество единиц подвижного состава – не менее 15;
- наличие подвижного состава средней и (или) большой вместимости;
- работа на рынке предоставления транспортных услуг – не менее 3 лет.

В целях обезличивания рассматриваемых автотранспортных предприятий им были присвоены следующие шифры: АТП-1, АТП-2, АТП-3.

Оценка «0» присваивалась в том случае, если данный критерий не выполнялся или в предприятии отсутствовала соответствующая система или технология. Максимальное количество баллов начислялось при выполнении критерия на 100%. По некоторым критериям присваивались определённые доли от максимальной оценки. Это связано с тем, что критерий выполнен не в полной мере (к примеру, установлена или используется система или технология не на всех транспортных средствах).

Согласно многочисленным исследованиям, а также в соответствии со Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 гг.⁴, программой «Цифровая экономика Российской Федерации»⁵ внедрение современных информационных технологий в разных сферах, в том числе и на общественном пассажирском транспорте, является необходимым. Для выполнения этого условия авторами сформулированы рекомендации по обеспечению информационными технологиями в рамках текущей работы.

Необходимым минимальным порогом обеспеченности информационными технологиями из перечня, представленного в таблице 1, считаем 50%. Данный параметр основывается на анализе оценок эффективности внедрения различных информационных технологий в работу общественного пассажирского транспорта различных городов [27, 28, 29, 30].

Для итоговой оценки информационно-технологического развития общественного пассажирского транспорта были сформулированы следующие уровни:

- достаточный – свыше 12 баллов (более 75%);
- удовлетворительный – от 8 до 12 баллов (50–75%);
- недостаточный – менее 8 баллов (менее 50%).

Недостаточный уровень развития общественного пассажирского транспорта показывает, что работа перевозчика осуществляется на низком уровне эффективности, применительно использования информационных технологий, рекомендуется их внедрение и дальнейшее использование.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки эффективности работы общественного пассажирского транспорта авторами разработан и апробирован отдельный показатель – информационно-технологический. Данный показатель был внесён в существующую схему [22] оценки эффективности транспортной системы города. Информационно-технологический показатель включил в себя две укрупненные группы критериев (рисунок): информационно-обслуживающие и контрольно-учётные, включающие критерии оценки, перечисленные в таблице 1. Такой метод оценки многофункционален и одновременно может выступать и в качестве индикатора уровня развития системы городских перевозок в целом и в качестве критерия для разработки новых мероприятий для повышения эффективности работы системы пассажирских перевозок.

⁴ Указ Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» (Дата обращения: 23.08.2022).

⁵ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (Дата обращения: 23.08.2022).



Рисунок – Показатели эффективности транспортной системы города
Источник: составлено авторами.

Figure – Performance indicators of the city's transport system
Source: compiled by the authors.

Особенностью такой системы оценивания является не применение стандартных экономических расчётов и транспортно-эксплуатационных показателей, а оценивание по ряду критериев. Показатель не отражает полностью всех аспектов перевозочного процесса, как и все предыдущие, но значительно расширяет способности его оценки. Применение при анализе всех способов в системе позволит разрабатывать новые практические методы по повышению уровня эффективности.

Применение современных устройств для отслеживания и контроля перевозочного процесса представляют собой сложное технологическое оборудование, требующее определенных знаний для установки и контроля при их эксплуатации. К тому же определенные элементы могут требовать ремонта и своевременного обслуживания, например, камеры видеонаблюдения в салоне транспортного средства, которые могут потребоваться для обеспечения транспортной безопасности, терминалы для оплаты проезда или иное устройство, способное производить оплату в автономном режиме. Такие элементы становятся необходимыми, но в расчётных формулах при оценке затрат не учитываются материальные вложения для поддержания их работы.

В таблице 2 приведены результаты оценки эффективности автотранспортных предприятий г. Тамбова, занимающихся перевозкой пассажиров общественным транспортом, по информационно-технологическому показателю.

На автобусах организации АТП-1, задействованных в перевозках по регулярным городским маршрутам, установлена система ГЛОНАСС и навигационное оборудование. Информация о движении транспортных средств передаётся в диспетчерский пункт, а примерное время прибытия на остановочный пункт выводится на информационное табло. Несмотря на неточность этих данных и несовершенство системы, улучшается уровень взаимодействия с пассажирами, а также повышается уровень контроля за движением транспорта. Дополнительной функцией является возможность отслеживания уровня расхода топлива на основе датчиков, подключаемых к топливному баку.

Более 80% транспортных средств АТП-1 оборудованы кнопками SOS, работа которых основана на российской системе ГЛОНАСС. Данная технология позволяет при чрезвычайных ситуациях обратиться за помощью, а спутниковая система достаточно точно определит нахождение объекта в пространстве.

Таблица 2
Оценка эффективности автотранспортных предприятий
г. Тамбова по информационно-технологическому показателю
Источник: составлено авторами.

Table 2
Efficiency assessment for Tambov motor transport enterprises by information technology indicator
Source: compiled by the authors.

Наименование критерия оценки информационно-технологического показателя	Количество баллов		
	АТП-1	АТП-2	АТП-3
Элементы системы, оцениваемые одним баллом			
Автоматический контроль уровня расхода топлива	0,75	0,5	0,5
Автоматическое отслеживание оставшегося пробега до следующего планового технического обслуживания подвижного состава	0,75	0	0,5
Автоматический подсчёт рабочих часов водителя	1	1	1
Автоматический расчёт планового прибытия транспортного средства на остановочный пункт	1	1	1
Наличие технических средств для сообщения о чрезвычайных ситуациях	0,8	0,7	0,5
Применение автоматических и полуавтоматических систем помощи водителю в управлении транспортным средством	0,5	0,5	0,5
Автоматические системы для очистки воздуха	0	0	0,25
Электронный документооборот при организации перевозочного процесса	0,5	1	0,5
Применение систем видеонаблюдения для обеспечения транспортной безопасности	1	0	0,8
Элементы системы, оцениваемые двумя баллами			
Автоматизированная система оплаты проезда без участия водителя или кондуктора (водитель полностью нацелен на управление транспортным средством)	1	1	1
Элементы системы, оцениваемые тремя баллами			
Использование ИТС для повышения средней скорости движения общественного транспорта	0	0	0
Наличие системы автоматического подсчёта пассажиропотока	1	0	0
Итоговое количество баллов	8,3	5,7	5,55

Большая часть эксплуатируемых транспортных средств (75%) оснащена датчиками, в частности, ГАЗ NEXT оснащены бортовыми компьютерами. Электронные системы позволяют оценивать средний уровень расхода топлива, остаточный пробег до следующего технического обслуживания. При возникновении ошибок вся информация выводится на электронный дисплей для обеспечения своевременного ремонта. Автобусы средней вместимости ПАЗ ВЕКТОР NEXT оборудованы системой износа тормозных колодок. При достижении определённого уровня износа включается индикатор, сообщающий о необходимости замены указанных элементов.

Салоны всех транспортных средств оборудованы камерами видеонаблюдения. Целью данной системы является повышение безо-

пасности и увеличение уровня контроля за противоправными действиями граждан. Вторая камера направлена на проезжую часть по направлению движения транспорта. Полученный видеоматериал позволит более детально выяснять обстоятельства возможных ДТП.

В АТП-1 имеется в наличии автоматическая система подсчёта пассажиров. Технология позволяет отслеживать пассажиропоток и регулярно отслеживать изменения через различные временные промежутки, например, раз в квартал. На данный момент система не используется из-за её высокой стоимости.

Интеллектуально-транспортные системы в г. Тамбове не применяются. Их внедрение потенциально способно оптимизировать пассажиропоток благодаря выделению приоритета для пассажирского транспорта.

На 7 автобусах (20% от общего числа) применяется внутреннее информационное табло, что также связано с высокой стоимостью его внедрения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка информационно-технологических показателей пассажирских автотранспортных предприятий г. Тамбова показала, что уровень их оснащённости информационными технологиями и системами находится на достаточно низком уровне. В АТП-1 уровень информационно-технологического развития оказался удовлетворительным и составил 8,3 балла. АТП-2 и АТП-3 набрали 5,7 и 5,55 балла соответственно, что является недостаточным показателем.

Низкий уровень информационно-технологического развития предприятия в первую очередь связан с необходимостью капиталовложений. Кроме того, наличие данных систем и технологий не является обязательным. Поэтому перевозчик не всегда нацелен на их закупку и дальнейшую эксплуатацию.

Уточнённая методика информационно-технологической оценки автотранспортных предприятий может быть использована при организации конкурсного отбора перевозчиков как одного из критериев качества перевозки пассажиров.

В соответствии с изученными проблемами работы общественного пассажирского транспорта в городских условиях можно сформулировать следующие мероприятия, позволяющие повысить эффективность его работы:

- использование информационных программных продуктов и технологий для автоматизирования функций управления системой пассажирского городского транспорта;
- применение телекоммуникационных систем обеспечения функционирования для информирования пассажиров в салоне транспортного средства и на объекте транспортной инфраструктуры;
- улучшение процесса мониторинга и диспетчеризации работы подвижного состава на маршруте с помощью системы ГЛОНАСС;
- внедрение ИТС для повышения пропускной способности улично-дорожной сети и снижения временных затрат при передвижении в городской среде;
- увеличение инвестиций на обеспечение городских пассажирских перевозок информационными системами и технологиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горев А. Э., Попова О. В. Развитие городского пассажирского транспорта // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 2(81). С. 45–47.
2. Rakhmatullina A. R., Korobeynikova E. V. Trends in urban public transport // International Journal of Advanced Studies. 2020. Vol. 10. No 3. P. 123-131. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-3-123-131.
3. Дьячкова О. М., Рыжова А. С., Дьячкова А. А., Безматерных К. Л. Факторы привлекательности городского общественного пассажирского транспорта // Вестник Академии знаний. 2021. № 5(46). С. 127–132. DOI: 10.24412/2304-6139-2021-5-127-132.
4. Батукаев А. Т. Мировой опыт оценки эффектов от реализации проектов в сфере городского общественного транспорта // Экономические науки. 2021. № 199. С. 153–158. DOI: 10.14451/1.199.153.
5. Ingeborgrud L. The Shaping of Urban Public Transport: Two Cases of Alternative Leading Objects // Science & Technology Studies. 2020. 33(1). P. 22-35. DOI: 10.23987/sts.69949.
6. Muñoz-Raskin R., Urquidi M., Bagolle A. Modernization of Urban Public Transport // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2015. Vol. 2512. Issue 1. P. 31-37. DOI: 10.3141/2512-04.
7. Володькин П. П., Рыжова А. С. Особенности системы городского общественного пассажирского транспорта в России // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. № 1–3. С. 128–131.
8. Лукьянчук Д. В., Подшивалова К. С. Проблемы городского общественного электрического транспорта в г. Пензе // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2021. № 5(36). С. 107–115.
9. Гавриков В. А., Пеньшин Н. В., Анохин С. А. Социально-экономические проблемы организации работы городского общественного транспорта // Глобальный научный потенциал. 2019. № 3 (96). С. 125–129.
10. Ивченко М. И. Основные аспекты модификации сети городского общественного транспорта // Державинский форум. 2021. Т. 5, № 19. С. 155–161.
11. Таранцев А. А., Королёв О. А., Васьков В. Т. Анализ закономерностей обеспечения безопасности городского общественного транспорта Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2 (50). С. 6–10.
12. Петрова Д. В. Концепция информационной системы мониторинга пассажиропотоков общественного транспорта городских агломераций // Информационное общество: образование, наука, культура и технологии будущего. 2019. № 3. С. 27–40.
13. Polat C. The Demand Determinants for Urban Public Transport Services: A Review of the Literature // Journal of Applied Sciences. 2012. Vol. 12. P. 1211-1231. DOI: 10.3923/jas.2012.1211.1231.

14. Dragu V., Roman E. A., Roman V. C. Quality assessment in urban public transport // *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*. 2013. Vol. 8. Issue 3. P. 32-43. <https://www.researchgate.net/publication/289732784>.
15. Мишина Е. С., Лебедь Р. К., Хмелев Р. Н. К вопросу оснащения городского общественного транспорта системами мониторинга и обеспечения транспортной безопасности // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 10. С. 326–332.
16. Цариков А. А., Бондаренко В. Г., Бушуева В. Е. Влияние конструкции подвижного состава городского общественного транспорта на время посадки-высадки пассажиров // *Инновационный транспорт*. 2020. № 3(37). С. 7–15. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-3-7-15.
17. Постолиит А. В. Автоматизация учета поездок пассажиров на городском общественном транспорте // *Транспорт Российской Федерации*. 2021. № 1–2(92–93). С. 46–51.
18. Дугин Г. С. Опыт внедрения инновационных методов для эффективной деятельности городского общественного транспорта // *Вестник транспорта*. 2019. № 2. С. 31–34.
19. Кофейников В. В., Калимуллин Р. Ф. Анализ факторов, влияющих на качество услуг городского общественного транспорта // *Научный Лидер*. 2021. № 14(16). С. 121–123.
20. Aldás R. A., Buele J., Salazar L. F., Soria A., Manzano S. Integrated Information System for Urban Public Transport // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019. Vol. 8(4C). P. 98-102. <https://www.researchgate.net/publication/334960671>.
21. Киншт А. В., Малова Е. Д. Развитие системы общественного транспорта как один из факторов экологизации городской среды // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23, № 3. С. 46–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-46-57.
22. Вельможин А. В., Гудков В. А., Куликов А. В., Сериков А. А. Эффективность городского пассажирского общественного транспорта: монография. Волгоград. гос. техн. ун-т. Волгоград. 2002. 256 с.
23. Яменсков А. И., Голубкина К. В., Абрамян С. К. Проблемы качества перевозок пассажиров городским общественным транспортом в городе Новороссийске // *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*. 2019. № 1. С. 124–128. DOI: 10.23672/SAE.2019.1.24679.
24. Faridai S., Juraeva R.S., Darovskikh S.N., Qodirov Sh.Sh. Neural network model for predicting passenger congestion to optimize traffic management for urban public transport // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021. Vol. 21. No 1. P. 59-69. DOI: 10.14529/ctcr210106.
25. Кузнецов А. В. Перспективные направления развития городского общественного транспорта // *Академическая публицистика*. 2021. № 10–2. С. 68–72.
26. Zhai Z., Fu X., Yi M. et al. Haze management: is urban public transportation priority effective? // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 32749–32762. DOI: 10.1007/s11356-021-17871-y.
27. Лучко М. И. Теоретические основы информационных технологий в пассажирских транспортно-логистических системах // *Вести Автомобильно-дорожного института*. 2021. № 2(37). С. 36–44.
28. Сиваков В. В., Боровая К. С. Внедрение информационных технологий при организации пассажирских маршрутных перевозок в г. Брянске // *Транспортное дело России*. 2019. № 4. С. 98–99.
29. Зырянов В. В., Семчугова Е. Ю., Литвина А. А. Повышение эффективности управления городским пассажирским транспортом Ростова-на-Дону // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013. Т. 2, № 2(71). С. 347–351.
30. Лим И. Ю. Влияние цифровых технологий на «оживление» экономики Кыргызской Республики, связанных с управлением городскими пассажирскими перевозками // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2020. № 3. С. 105–111. DOI: 10.26104/NNTIK.2019.45.557.

REFERENCES

1. Gorev A. E., Popova O. V. Razvitie gorodskogo passazhirskogo transporta [Development of urban passenger transport]. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2019; 2 (81): 45-47. (in Russ.)
2. Rakhmatullina A. R., Korobeynikova E. V. Trends in urban public transport. *International Journal of Advanced Studies*. 2020; 10. 3: 123-131. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-3-123-131.
3. D'yachkova O. M., Ryzhova A. S., D'yachkova A. A., Bezmaternyh K. L. Faktory privlekatel'nosti gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta [Factors of attractiveness of urban public passenger transport]. *Vestnik Akademii znaniy*. 2021; 5(46): 127-132. DOI: 10.24412/2304-6139-2021-5-127-132. (in Russ.)
4. Batukaev A. T. Mirovoj opyt ocenki effektivostei ot realizacii proektov v sfere gorodskogo obshchestvennogo transporta [World experience in assessing the effects of the implementation of projects in the field of urban public transport]. *Ekonomicheskie nauki*. 2021. 199: 153-158. DOI: 10.14451/1.199.153. (in Russ.)
5. Ingeborgrud L. The Shaping of Urban Public Transport: Two Cases of Alternative Leading Objects. *Science & Technology Studies*. 2020; 33 (1): 22-35. DOI: 10.23987/sts.69949.
6. Muñoz-Raskin R., Urquidí M., Bagolle A. Modernization of Urban Public Transport. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015. 2512. 1: 31-37. DOI: 10.3141/2512-04.
7. Volod'kin P. P., Ryzhova A. S. Osobennosti sistemy gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta v Rossii [Features of the urban public passenger transport system in Russia]. *Dal'nij Vostok*:

problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. 2019; 1-3: 128-131. (in Russ.)

8. Luk'yanchuk D. V., Podshivalova K. S. Problemy gorodskogo obshchestvennogo elektricheskogo transporta v g. Penze [Problems of urban public electric transport in Penza]. *Obrazovanie i nauka v sovremenom mire. Innovacii*. 2021; 5 (36): 107-115. (in Russ.)

9. Gavrikov V. A., Pen'shin N. V., Anohin S. A. Social'no-ekonomicheskie problemy organizatsii raboty gorodskogo obshchestvennogo transporta [Socio-economic problems of organizing the work of urban public transport]. *Global'nyy nauchnyy potencial*. 2019; 3 (96): 125-129. (in Russ.)

10. Ivchenko M. I. Osnovnye aspekty modifikatsii seti gorodskogo obshchestvennogo transporta [The main aspects of the modification of the urban public transport network]. *Derzhavinskij forum*. 2021; 5. 19: 155-161. (in Russ.)

11. Tarancev A. A., Korolyov O. A., Vas'kov V. T. Analiz zakonomernostej obespecheniya bezopasnosti gorodskogo obshchestvennogo transporta Sankt-Peterburga [Analysis of the patterns of ensuring the safety of urban public transport in St. Petersburg]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2019; 2 (50): 6-10. (in Russ.)

12. Petrova D. V. Konceptsiya informacionnoj sistemy monitoringa passazhiropotokov obshchestvennogo transporta gorodskih aglomeracij [The concept of an information system for monitoring passenger flows of public transport in urban agglomerations]. *Informacionnoe obshchestvo: obrazovanie, nauka, kul'tura i tekhnologii budushchego*. 2019; 3: 27-40. (in Russ.)

13. Polat C. The Demand Determinants for Urban Public Transport Services: A Review of the Literature. *Journal of Applied Sciences*. 2012. 12: 1211-1231. DOI: 10.3923/jas.2012.1211.1231.

14. Dragu V., Roman E.A., Roman V.C. Quality assessment in urban public transport. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*. 2013. 8. 3: 32-43. <https://www.researchgate.net/publication/289732784>.

15. Mishina E. S., Lebed' R. K., Hmelev R. N. K voprosu osnashcheniya gorodskogo obshchestvennogo transporta sistemami monitoringa i obespecheniya transportnoj bezopasnosti [On the issue of equipping urban public transport with monitoring systems and ensuring transport security]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020; 10: 326-332. (in Russ.)

16. Carikov A. A., Bondarenko V. G., Bushueva V. E. Vliyanie konstrukcii podvizhnogo sostava gorodskogo obshchestvennogo transporta na vremya posadki-vysadki passazhirov [The influence of the design of the rolling stock of urban public transport on the time of boarding and disembarking passengers]. *Innovacionnyy transport*. 2020; 3 (37): 7-15. DOI 10.20291/2311-164X-2020-3-7-15. (in Russ.)

17. Postolit A. V. Avtomatizatsiya ucheta poezdok passazhirov na gorodskom obshchestvennom transporte [Automation of passenger travel accounting on urban public transport]. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2021; 1-2 (92-93): 46-51. (in Russ.)

18. Dugin G. S. Opyt vnedreniya innovacionnykh metodov dlya effektivnoj deyatel'nosti gorodskogo obshchestvennogo transporta [Experience in introducing innovative methods for the effective activities of urban public transport]. *Vestnik transporta*. 2019; 2: 31-34. (in Russ.)

19. Kofejnikov V. V., Kalimullin R. F. Analiz faktorov, vliyayushchih na kachestvo uslug gorodskogo obshchestvennogo transporta [Analysis of factors affecting the quality of urban public transport services]. *Nauchnyy Lider*. 2021;14(16): 121-123. (in Russ.)

20. Aldás R. A., Buele J., Salazar L. F., Soria A., Manzano S. Integrated Information System for Urban Public Transport. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019; 8(4C): 98-102. <https://www.researchgate.net/publication/334960671>.

21. Kinsht A. V., Malova E. D. Razvitie sistemy obshchestvennogo transporta kak odin iz faktorov ekologizatsii gorodskoj sredy [Development of the public transport system as one of the factors of greening the urban environment]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2021; 23. 3: 46-57. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-46-57. (in Russ.)

22. Vel'mozhin A. V., Gudkov V. A., Kulikov A. V., Serikov A. A. *Effektivnost' gorodskogo passazhirskogo obshchestvennogo transporta* [Efficiency of urban passenger public transport]. Volgograd. gos. tekhn. un-t. Volgograd, 2002. 256 p. (in Russ.)

23. Yamenskov A. I., Golubkina K. V., Abramyan S. K. Problemy kachestva perevozok passazhirov gorodskim obshchestvennym transportom v gorode Novorossiyske [Problems of the quality of passenger transportation by urban public transport in the city of Novorossiysk]. *Gumanitarnye, social'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki*. 2019. 1: 124-128. DOI: 10.23672/SAE.2019.1.24679. (in Russ.)

24. Faridai S., Juraeva R. S., Darovskikh S. N., Qodirov Sh. Sh. Neural network model for predicting passenger congestion to optimize traffic management for urban public transport. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021; 21. 1: 59-69. DOI: 10.14529/ctcr210106.

25. Kuznecov A. V. Perspektivnye napravleniya razvitiya gorodskogo obshchestvennogo transporta [Promising directions of urban public transport development]. *Akademicheskaya publicistika*. 2021; 10-2: 68-72. (in Russ.)

26. Zhai Z., Fu X., Yi M. et al. Haze management: is urban public transportation priority effective? *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29: 32749–32762. DOI: 10.1007/s11356-021-17871-y.

27. Luchko M. I. Teoreticheskie osnovy informacionnykh tekhnologij v passazhirskih transportno-logisticheskikh sistemah [Theoretical foundations of information technologies in passenger transport and logistics systems]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 2021; 2(37): 36-44. (in Russ.)

28. Sivakov V. V., Borovaya K. S. Vnedrenie informacionnyh tekhnologij pri organizacii passazhirskih marshrutnyh perevozok v g. Bryanske [Introduction of information technologies in the organization of passenger route transportation in Bryansk]. *Transportnoe delo Rossii*. 2019; 4: 98-99. (in Russ.)

29. Zyryanov V. V., Semchugova E. Yu., Litvina A. A. Povyshenie effektivnosti upravleniya gorodskim passazhirskim transportom Rostova-na-Donu [Improving the efficiency of urban passenger transport management in Rostov-on-Don]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; 2. 2(71): 347-351. (in Russ.)

30. Lim I. YU. Vliyanie cifrovyyh tekhnologij na «ozhivlenie» ekonomiki Kyrgyzskoj Respubliki svyazannyh s upravleniem gorodskimi passazhirskimi perevozkami [The impact of digital technologies on the «revival» of the economy of the Kyrgyz Republic related to the management of urban passenger transportation]. *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*. 2020; 3: 105-111. DOI: 10.26104/NTTIK.2019.45.557. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гуськов А. А. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовал в разработке следующих разделов: аннотация, материалы и методы, результаты, обсуждение и заключение, а также осуществлял общее научное руководство статьёй.

Залукаева Н. Ю. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовала в разработке следующих разделов: введение, результаты, обсуждение и заключение, а также осуществляла редактирование и перевод статьи.

Севостьянов М. А. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовал в разработке следующих разделов: введение, материалы и методы, результаты, обсуждение и заключение.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Artem A. Guskov made a contribution to the overall work which was 1/3 of the total volume of the article, participated in the development of the following sections: abstract, introduction, results, discussion and conclusions, and also carried out general scientific guidance of the article.

Natalia Yu. Zalukaeva made a contribution to the overall work amounted to 1/3 of the total volume of the article, participated in the development of the following sections: materials and methods, results, discussion and conclusions, as well as carried out editing and translation of the article.

Maxim A. Sevostyanov made a contribution to the overall work which was 1/3 of the total volume of the article, participated in the development of the following sections: introduction, materials and methods, results, discussion and conclusions, as well as conducted experimental studies.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гуськов Артем Анатольевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

Залукаева Наталья Юрьевна – ст. преп. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

Севостьянов Максим Александрович – магистрант кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

AUTHORS' AFFILIATION

Artem A. Guskov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Road Transport Engineering and Technology Department.

Natalia Yu. Zalukaeva – Senior Lecturer of the Road Transport Engineering and Technology Department.

Maxim A. Sevostyanov – Master's student of the Road Transport Engineering and Technology Department.

УДК 629.113

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>

EDN: LDWKYO

Научная статья



ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОБУСОВ

А. С. Денисов, Е. В. Феклин, А. В. Игнатов*

СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Саратов, Россия

denisov0307@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4732-0648>feklin_2013@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6778-4458>camoxod1990@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7166-1354>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Акцент сделан на совершенствование системы технического обслуживания и ремонта городских автобусов в масштабах крупных городов в частности и регионов в целом. В связи с повышением количества подвижного состава увеличивается нагрузка на существующие организации технического сервиса, что в свою очередь приводит к их перегрузке. Следовательно, снижаются показатели эффективности и безопасности эксплуатации автобусов. Предлагаемое решение – разработка системы централизованных специализированных производств.

Материалы и методы. Рассмотрена система технического обслуживания и ремонта с точки зрения теории предельной полезности. Представлены зависимости общей и предельной полезности от количества товаров (услуг). Дано описание термина «специализация» с точки зрения автотранспортной отрасли. Обоснована необходимость совмещения универсальных и специализированных постов.

Результаты. Представлены итоги экспериментального исследования по десяти пассажирским предприятиям. Приведены результаты вычислений показателей эффективности зоны текущего ремонта. Отражена зависимость годовых затрат и прибыли зоны текущего ремонта из десяти постов от уровня специализации. Проанализирована зависимость коэффициента технической готовности автобусов от масштаба парков по России. Представлены натуральные факторы, влияющие на коэффициент технической готовности. Получена адекватная математическая модель с физическими переменными зависимости коэффициента технической готовности от масштаба предприятия и уровня специализации с последующей обработкой и верификацией результатов.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования предназначены для предприятий пассажирского транспорта. Полученные данные позволят разработать систему кооперации производственных мощностей технического сервиса с целью повышения производительности выполнения заявок на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техническое обслуживание и ремонт, автобус, кооперация, специализация, централизованное специализированное производство, эффективность, безопасность, теория предельной полезности, коэффициент технической готовности, сервис.

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов благодарит руководство и коллектив пассажирских предприятий Саратовской области, на которых проводилось исследование, редакцию журнала «Вестник СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Денисов А. С., Феклин Е. В., Игнатов А. В. Влияние уровня специализации производства на эффективность технического сервиса и безопасность эксплуатации автобусов // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 666-679. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>

© Денисов А. С., Феклин Е. В., Игнатов А. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>
EDN: LDWKYO

INFLUENCE OF PRODUCTION SPECIALISATION LEVEL ON EFFICIENCY OF TECHNICAL SERVICE AND BUSES OPERATION SAFETY

Alexander S. Denisov, Evgeny V. Feklin, Anton V. Ignatov*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Saratov, Russia

denisov0307@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4732-0648>

feklin_2013@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6778-4458>

camoxod1990@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7166-1354>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. The focus is on improving the maintenance and repair system of city buses on the scale of large cities in particular and regions in general. Due to the increase in the number of rolling stock, the load on the existing technical service organisations increases, which in turn leads to their overload. Consequently, the efficiency and safety indicators of bus operation are reduced. The proposed solution is to develop a system of centralised specialised production.

Materials and methods. The system of maintenance and repair is considered from the point of view of the marginal utility theory. Dependences of total and marginal utility on the quantity of goods (services) are presented. The term 'specialization' is described from the point of view of the motor transport industry. The necessity of combining universal and specialised posts is justified.

Results. The results of the experimental study on ten passenger enterprises are presented. The results of calculations of the efficiency indicators of the current repair area are given. The dependence of annual costs and profit of the current repair zone of ten posts on the level of specialisation is reflected. The dependence of the coefficient of technical readiness of buses on the scale of parks in Russia is analysed. The natural factors, influencing the coefficient of technical readiness are presented. An adequate mathematical model with physical variables of the dependence of the coefficient of technical availability on the scale of the enterprise and the level of specialisation was obtained with further processing and verification of the results.

Discussion and conclusions. The results of the study are intended for the enterprises of passenger transport. The data obtained will allow to develop a system of cooperation of technical service production facilities in order to improve the performance of requests for maintenance and repair of rolling stock.

KEYWORDS: maintenance and repair, bus, cooperation, specialisation, centralised specialised production, efficiency, safety, marginal utility theory, technical availability factor, service.

ACKNOWLEDGEMENTS: the team of authors would like to thank the management and staff of passenger enterprises in Saratov region, where the research was carried out, the editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal, as well as the reviewers of the article.

The article was submitted 11.05.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Denisov A. S., Feklin E. V., Ignatov A. V. Influence of production specialisation level on efficiency of technical service and safety of buses operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 666-679. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>

© Denisov A. S., Feklin E. V., Ignatov A. V., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности и качества проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР) подвижного состава пассажирского автотранспорта является одной из первоочередных задач. Пассажирские автотранспортные предприятия (АТП) в значительной своей массе состоят из подвижного состава, возрастом старше 10 лет. В последнее время количество АТП в классическом понимании значительно сократилось, тем самым повысив нагрузку на оставшуюся технику, а следовательно, и увеличив количество возникающих отказов и неисправностей, которые могут привести к дорожно-транспортным происшествиям. Частыми причинами технического характера, которые способствуют возникновению ДТП, являются: неисправность тормозной системы, рулевого управления, световой сигнализации, входных дверей, элементов салона (поручни) и т. д. Неудовлетворительное техническое состояние подвижного состава также является причиной увеличения расхода эксплуатационных материалов (топливо, масла и т. д.). Даже обладая всем необходимым оборудованием, при неэффективной организации работы производственно-технической базы экономический эффект для ПТБ снижается. Следовательно, в рамках крупных городов возникает необходимость укрупнения производственных предприятий автотехнического сервиса для увеличения объемов выполняемых заявок при сокращении срока их выполнения.

Ключевым элементом региональной системы обеспечения работоспособности автобусов становятся централизованные специализированные производства (ЦСП), т. е. предприятия, объединенные по определенным типам работ по техническому обслуживанию и ремонту подвижного состава. Таким образом, заявки будут распределяться на специализированные посты в рамках ЦСП.

Одним из вариантов укрупнения системы ТОиР в масштабах крупных городов является концентрация производства – это действенная форма его общественной организации, представляющая сосредоточение производства на более крупных предприятиях. Концентрация производства происходит или за счёт роста доли крупных предприятий в общем объеме производства региона или отрасли (перевозок пассажиров мегаполиса) или за счёт роста размеров самих предприятий.

Вопросы организации и проведения технического обслуживания и ремонта подвижного

состава, а также влияния его состояния на безопасность дорожного движения затрагивались в работах следующих авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Главной причиной развития концентрации производства является повышение прибыли, что в свою очередь обуславливает укрупнение масштабов производства. Для этого предприятию необходимо инвестировать часть прибыли в добавочные средства производства (в основном в технологическое оборудование) и исполнительный квалифицированный персонал. Основным показателем уровня концентрации производства является удельный вес крупных предприятий в общем объеме производства отрасли:

$$Y_k = O_k / O_o, \quad (1)$$

где Y_k – уровень концентрации, %; O_k – объем производства (или перевозок на транспорте) крупных предприятий; O_o – общий объем производства (перевозок).

Целью настоящего исследования является выявление влияния уровня концентрации и специализации производства на эффективность технического сервиса и безопасность эксплуатации городских автобусов для последующей разработки единой системы технического сервиса подвижного состава в рамках крупных городов в частности и регионов в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работах [16, 17] экстенсивный характер развития организаций автотехнического сервиса имеет свои экономические пределы. Следовательно, необходимо повышать эффективность его работы интенсивными методами, к которым относится и система управления производством. Согласно теории предельной полезности различают две формы полезности: общую (TU), т. е. совокупную полезность, получаемую в результате потребления всех благ (рисунок 1) и предельную (MU) – дополнительную полезность, извлекаемую потребителем из добавочной единицы конкретной продукции. То есть предельная полезность – это производная от общей полезности dTQ по количеству товара или услуг dQ (рисунок 2) $MU = dTU/dQ$.

Количество услуг городских автобусов, то есть их полезность пассажирам, напрямую связано с их количеством на маршрутах, которое во многом определяется коэффициентом технической готовности. Следовательно, коэффициенты технической готовности и использования парка могут быть приняты в качестве параметров полезности.

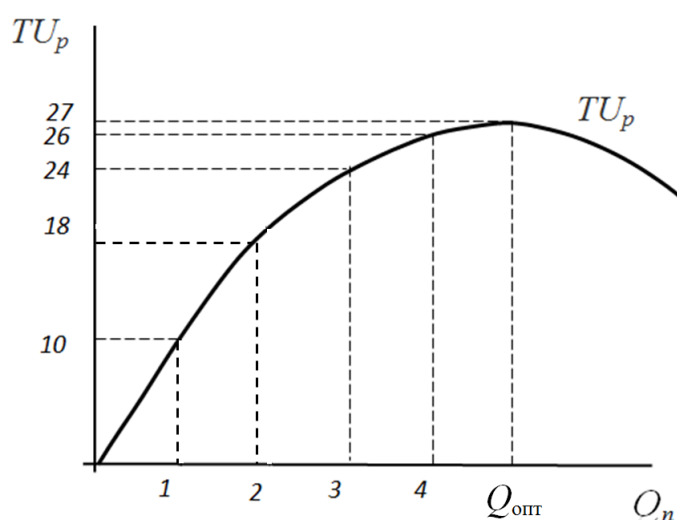


Рисунок 1 – Зависимость общей полезности от количества товара или услуг [17]

Figure 1 - Dependence of total utility on the amount of goods or services [17]

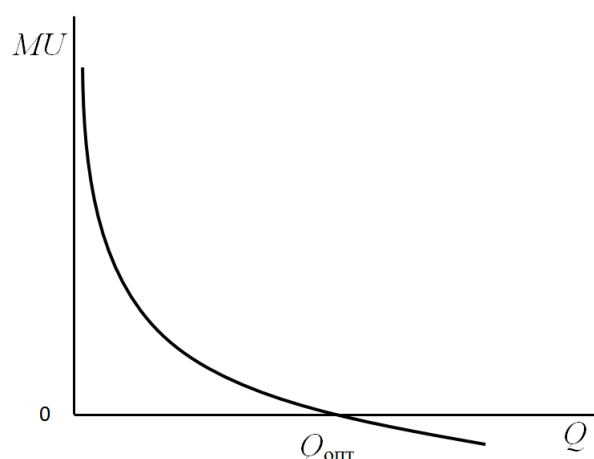


Рисунок 2 – Зависимость предельной полезности от количества товара или услуг [17]

Figure 2 - Dependence of marginal utility on the quantity of a good or service [17]

Параметр оптимизации – это коэффициент технической готовности, который принимает максимум при искомом значении параметра полезности, то есть уровня концентрации. Для его определения необходимо обработать статистические данные методом наименьших квадратов по полиному второй степени. Затем взять производную и, приравняв её к нулю, определить оптимальное значение уровня концентрации. Аналогично определяется и оптимальное значение уровня централизации по другому массиву статистических данных.

Что касается термина «специализация», то с точки зрения автотранспортной отрасли – это ориентация производства на определенный тип ограниченной номенклатуры работ по выполнению ТОиР подвижного состава.

Исходя из анализа преимуществ и недостатков специализированных и универсальных постов текущего ремонта и положений предельной полезности, по статистическим данным определены зависимости прибыли ремонтного комплекса от уровня специализации (рисунок 3).

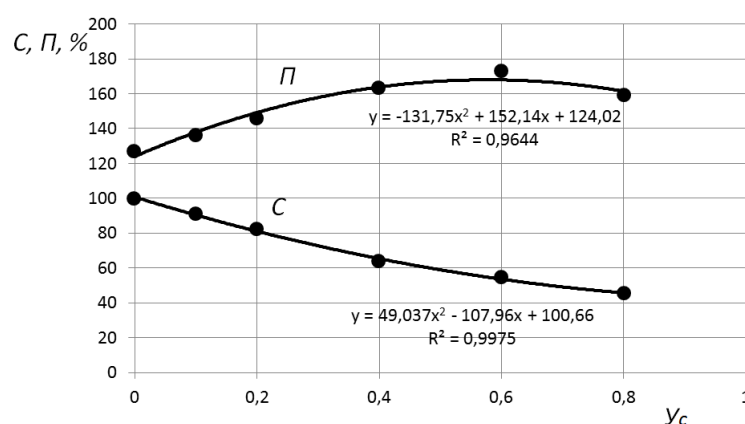


Рисунок 3 – Зависимость годовых затрат C и прибыли P зоны ТР из 10 постов от уровня специализации $У_c$ относительно затрат при всех универсальных постах
Источник: на основе статистических данных АО «Межгородтранс».

Figure 3 – Dependence of annual costs C and profit P of the TR zone of 10 posts on the level of specialisation of U_s in relation to the costs of all universal posts
Source: based on statistical data of AO Mezhgorodtrans.

Практически целесообразно совмещение универсальных и специализированных постов. При этом преимущества одних становятся недостатками других видов постов [18, 19, 20]. Допустим, что все посты зоны универсальные. В этом случае производительность зоны составит

$$P_3 = P_n \cdot n \cdot K_{нз} \cdot K_{рв}, \quad (2)$$

где P_n – расчётная годовая производительность поста; n – число постов; $K_{нз}$ – коэффициент нагруженности зоны; $K_{рв}$ – коэффициент использования рабочего времени.

Годовые доходы от работы зоны ТР с учётом тарифа (T_3) составят

$$Дг = P_3 \cdot T_3, \quad (3)$$

Годовые затраты на содержание составят с учётом себестоимости (C) работы одного поста

$$Z_r = C \cdot P_3, \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

С увеличением доли специализированных постов эти показатели работы зон ТР будут изменяться. Повысится коэффициент загрузки оборудования, сократятся затраты на оплату

труда, так как уровень квалификации исполнителей тоже снизится. Поскольку специализированное оборудование существенно дешевле универсального, то будут снижаться и затраты на приобретение оборудования [21].

Однако при этом из-за повышения простоев постов в ожидании работ и на перемещение с поста на пост возрастают затраты на ремонт [22, 23]. Этот процесс специализации постов зоны ТР относится к стохастическим, то есть имеет и детерминирующую и вероятностную составляющие. Поэтому определить параметры зависимости показателей зоны можно по экспериментальным данным с использованием метода наименьших квадратов.

Такие наблюдения (пассивные эксперименты) были проведены в десяти пассажирских предприятиях. Результаты вычислений показателей эффективности зоны ТР по методике [24, 25] приведены в таблице 1.

Обработка этих данных по методу наименьших квадратов с использованием программного средства EXCEL позволила получить параметры показателей эффективности зоны ТР от доли специализированных постов. Зависимости показателей эффективности зоны ТР от уровня специализации и их параметры приведены на рисунке 3.

Таблица 1

Показатели эффективности зоны ТР при различной доле специализированных постов

Источник: на основе статистических данных АО «Межгородтранс».

Table 1

Performance indicators of the TR zone with a different proportion of specialised posts

Source: based on statistical data of AO Mezhorodtrans.

Показатели	Диапазон	Среднее значение	Коэффициент вариации
K_e	0,7–0,92	0,84	0,28
K_{pe}	0,8–0,95	0,88	0,31
K_{nz}	0,48–1,2	0,86	0,32
Z_e	410–520	465	0,35
D_e	850–1100	975	0,37
Y_c	0,1–0,7	0,38	0,38

Примечание: K_e – коэффициент выпуска; K_{pe} – коэффициент реализации выпуска; K_{nz} – коэффициент нагруженности зоны; Z_e – годовые расходы на пост, тыс. руб.; D_e – годовые доходы поста, тыс. руб.; Y_c – уровень специализации зоны ТР (доля специализированных постов).

При использовании аппроксимирующего полинома второй степени, параметры которого приведены на графике, оптимум уровня специализации при равенстве нулю производной функции. Её значение составит 0,577 (57,7%). По сравнению с фактическим средним уровнем специализации постов (см. таблицу 1) это почти на 20% выше.

Уровень специализации постов во многом определяется масштабом предприятия (уровнем концентрации). С ростом уровня концентрации обычно повышается и уровень специализации [26, 27]. Для более конкретного анализа этой взаимосвязи провели дифференциацию отчётных данных по влиянию масштаба предприятий на КТГ (рисунок 4) при различных уровнях специализации постов (рисунок 5).

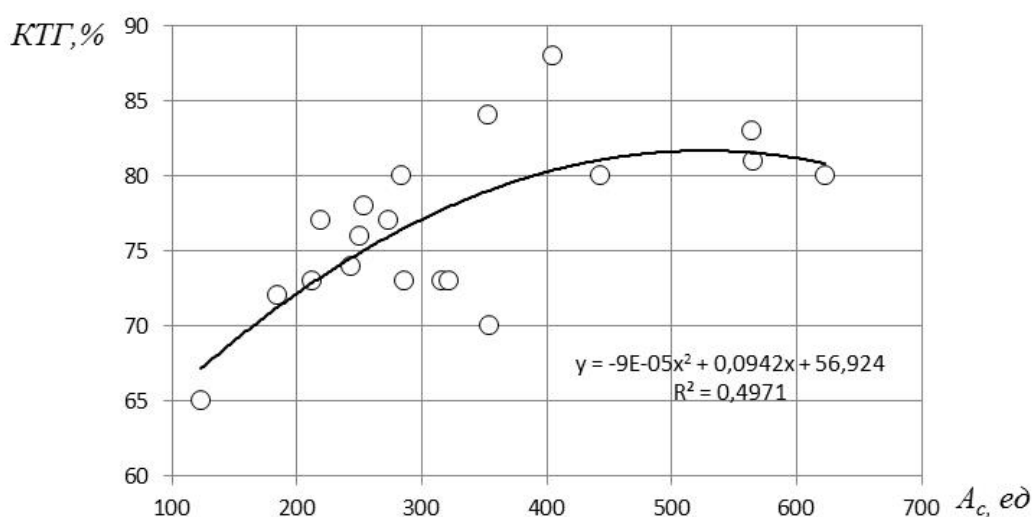


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента технической готовности автобусов от масштаба парков по России

Источник: на основе статистических данных из открытых источников.

Figure 4 – Dependence of the coefficient of technical readiness of buses on the scale of fleets in Russia

Source: based on statistical data from open sources.

Для математического моделирования исследуемого процесса приняли решение использовать полиномиальную модель в виде отрезка ряда Тейлора. Поскольку количество факторов $n = 2$, то для проведения исследований достаточно ограничиться полиномиальным рядом второго порядка, который для двухфакторного эксперимента принимает вид

$$Z = A_0 + A_1 \cdot X + B_1 \cdot Y + C \cdot X \cdot Y + D_1 \cdot X^2 + D^2 \cdot Y^2. \tag{5}$$

Сведем в таблицу 2 значения натуральных факторов, влияющих на КТГ.

Из рисунка 5 видно, что по мере концентрации подвижного состава несколько сокращается оптимум его по КТГ. Для более конкретного анализа обработали массив данных по методике программ Eureka: The Solver и Matlab 6.5. В качестве параметра оптимизации, позволяющего оценить эффективность ЦСП, принимали величину КТГ как показателя полезности.

В результате обработки данных по методике полного факторного эксперимента и соответствующих расчетов была получена адекватная математическая модель с физическими переменными зависимости КТГ (Z) от масштаба предприятия X и уровня специализации Y .

Подставляя полученные значения в общую формулу, получаем уравнение поверхности отклика

$$Z = 49,66 + 0,1134 \cdot X + 0,209 \cdot Y + 0,0001 \cdot X \cdot Y - 0,000124 \cdot X^2 - 0,00166 \cdot Y^2. \tag{6}$$

Результаты обработки представлены на рисунке 6. Полученное уравнение поверхности проверяли на адекватность, т. е. способность достаточно точно описывать действительный процесс с помощью критерия Фишера.

Таблица 2

Натуральные факторы, влияющие на КТГ. Характеристики опыта

Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Table 2

Natural factors affecting CTG. Characteristics of experience

Source: based on statistical data of passenger enterprises of Saratov region.

Влияющие факторы	Верхний уровень	Основной уровень	Нижний уровень	Интервал варьирования
Масштаб ЦСП, ед.	600	350	100	100
Уровень специализации, %	80	40	20	20

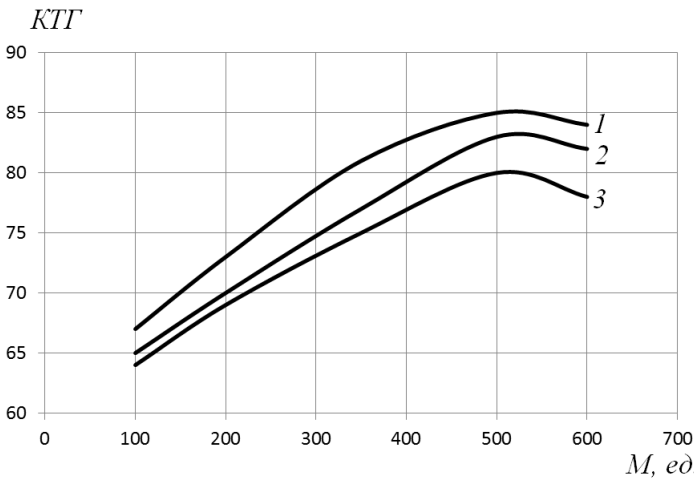


Рисунок 5 – Зависимость КТГ автобусных предприятий от масштаба M при различных значениях уровня специализации постов: 1 – 80 %; 2 – 40 %; 3 – 20 %

Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Figure 5 – Dependence of CTG of bus enterprises on the scale M with different values of the level of specialisation of posts: 1 - 80%; 2 - 40%; 3 - 20%

Source: based on statistical data of passenger enterprises of the Saratov region.

Таблица 3

Величины коэффициентов уравнения регрессии

Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Table 3

Values of the regression equation coefficients

Source: based on statistical data of passenger enterprises of the Saratov region.

Коэффициент	A0	A1	B1	C	D1	D2
Значение	49,66	0,1134	0,209	0,0001	-0,000124	-0,00166

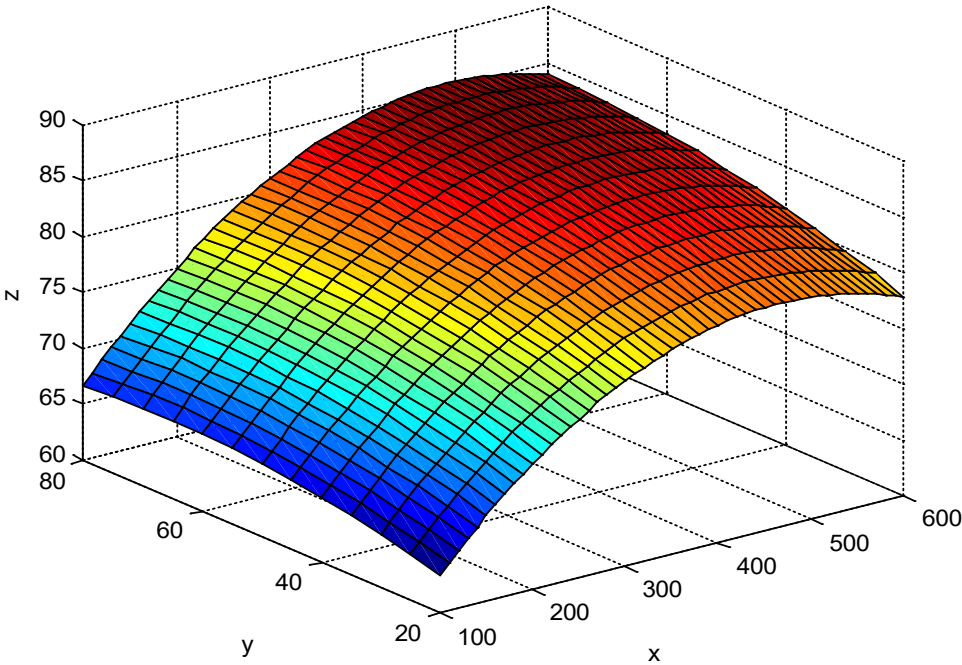


Рисунок 6 – Поверхность отклика КТГ автобусного парка на масштаб и на уровень специализации
Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Figure 6 – Response surface of the CTG of the bus fleet to scale and to the level of specialisation
Source: based on statistical data of passenger enterprises of the Saratov region.

Дисперсионный анализ показал адекватность математической модели, ее работоспособность и воспроизводимость. Дифференцирование уравнений регрессии, решение систем уравнений, нахождение экстремумов функции и графическое построение поверхно-

сти функции отклика производили с помощью программ Eureka: The Solver и Matlab 6.5. Анализ уравнения и функции поверхности отклика (рисунок 6) показал линии равной эффективности факторов M и Y_c (рисунок 7).

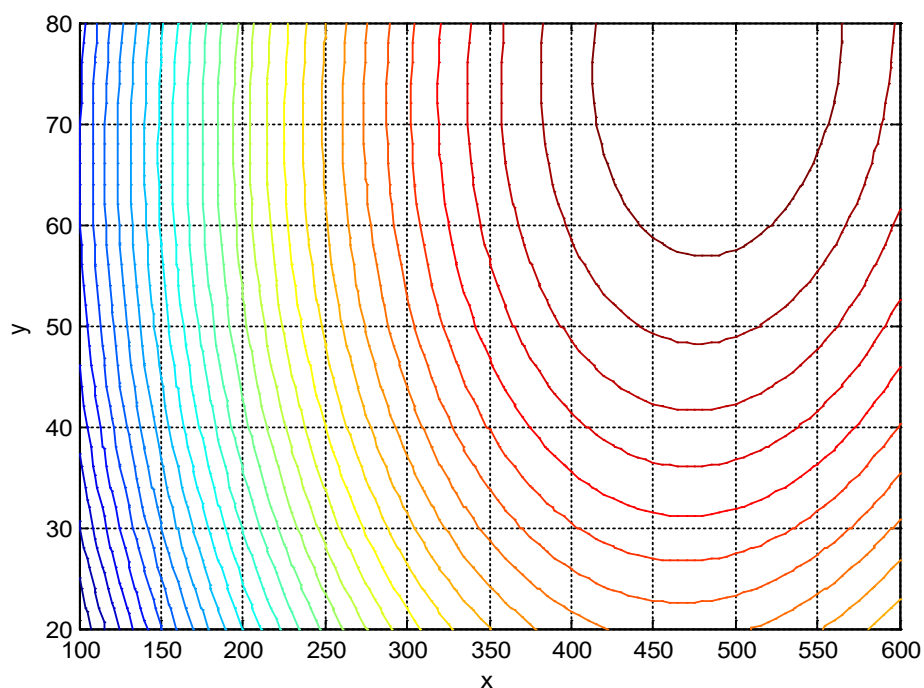


Рисунок 7 – Линии равной эффективности факторов M и U_s
 Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Figure 7 – Lines of equal effectiveness of M and U_s factors
 Source: based on statistical data of passenger enterprises in Saratov region.

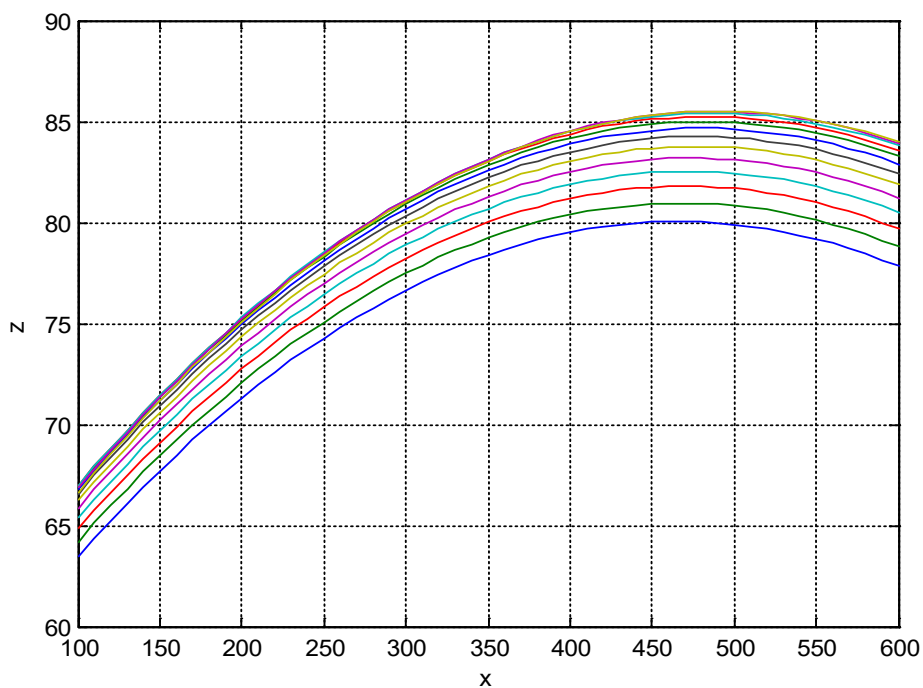


Рисунок 8 – Влияние масштаба предприятий (y) на КТГ (Z)
 при различных уровнях специализации (от 20 до 80 %)
 Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области

Figure 8 – Impact of the scale of enterprises (y) on CTG (Z) at different levels of specialisation (from 20 to 80%)
 Source: based on statistical data of passenger enterprises in Saratov region.

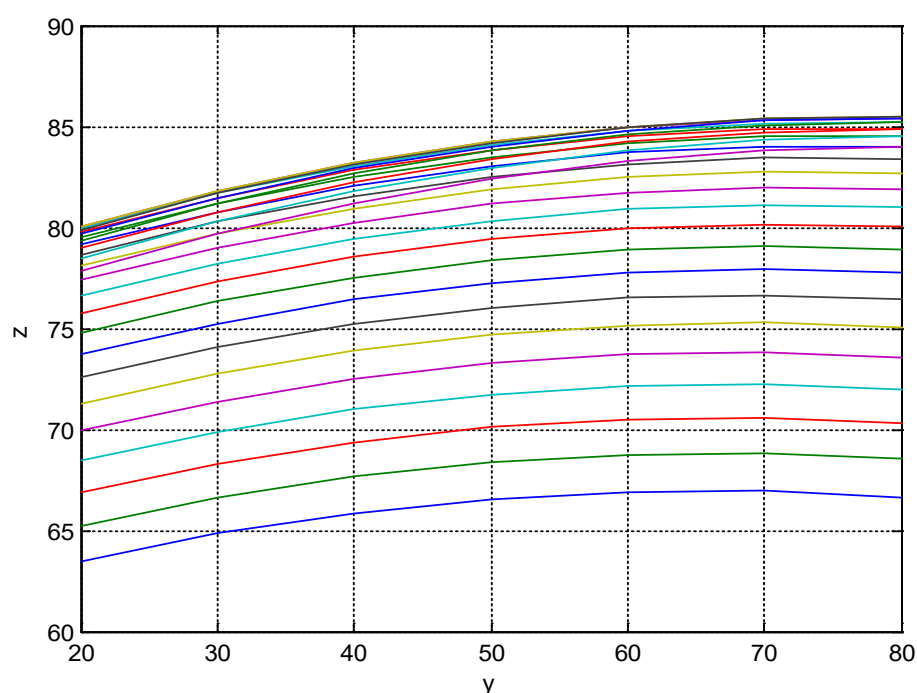


Рисунок 9 – Влияние уровня специализации (y) на КТГ (Z) при различных масштабах предприятий (от 100 до 600 единиц)
 Источник: на основе статистических данных пассажирских предприятий Саратовской области.

Figure 9 – Impact of the level of specialisation (y) on CTG (Z) at different scales of enterprises (from 100 to 600 units)

Source: based on statistical data of passenger enterprises in Saratov region.

Оптимальное значение M для заданного значения Y_c найдем, продифференцировав функцию по Y и приравняв полученную производную к нулю. Графически влияние факторов представлено на рисунках 8, 9.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенного исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Аргументировать процесс концентрации можно с позиций принципов синергетики.
2. Из исследуемых факторов наибольшее влияние на КТГ оказывает в пределах от 100 до 600 ед. концентрация – 19–20%, а затем специализация от 20 до 80 % – 9–10%.
3. Недостаточный уровень специализации постов зоне ТР увеличивает затраты на их со-

держание и приобретение в среднем на 10% и сокращает прибыльность работ на 14%. Следовательно, при создании или реорганизации ЦСП целесообразно использовать не менее 60% специализированных по видам агрегатов и узлов постов.

Результаты настоящего исследования предназначены для предприятий пассажирского транспорта. Полученные данные позволяют разработать систему кооперации производственных мощностей технического сервиса с целью повышения производительности выполнения заявок на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава. Что в свою очередь позволит унифицировать и систематизировать процесс ТОиР в крупных масштабах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Boryaev, A., Malygin, I., & Marusin, A. (2020). Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport. *Transportation Research Procedia* 50 68-76. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.009.
2. Chernyaev, I., Oleshchenko, E., & Danilov, I. (2020). Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation. *Transportation Research Procedia* 50 77-85. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.010.
3. Grayevskiy, I., Marusin, A., & Marusin, A. (2020). CDF simulation-based research of influence of mechanical defects in nozzles on environmental parameters of automotive diesel engines. *Transportation Research Procedia* 50 182-191. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.023.
4. Kapustin, A., Vorobiev, S., Gordienko, V., & Marusin, A. (2020). Method for improving the safety of diesel vehicles when operating on gas engine fuel (gas diesel engines). *Transportation Research Procedia* 50 226-233. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.028.
5. Malshakov, A., & Akzholov, A. (2020). Method to determine required amount of spare parts for air suspension in large-size buses. *Transportation Research Procedia* 50 414-421. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.049.
6. Rakov, V. (2020). Determination of optimal characteristics of braking energy recovery system in vehicles operating in urban conditions. *Transportation Research Procedia* 50 566-573. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.068.
7. Rakov, V., Kapustin, A., & Danilov, I. (2020). Study of braking energy recovery impact on cost-efficiency and environmental safety of vehicle. *Transportation Research Procedia* 50 559-565. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.067.
8. Repin, S., Bukirov, R., & Vasilieva, P. (2020). Study on effects of damping characteristics of base chassis suspension on operational safety of transport and handling machinery. *Transportation Research Procedia* 50 574-581. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.069.
9. Lobanova, Y., & Evtiukov, S. (2020). Role and methods of accident ability diagnosis in ensuring traffic safety. *Transportation Research Procedia* 50 363-372. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.043.
10. Taysayev, K., Terentyev, A., Evtukov, S., & Arifullin, I. (2020). Efficiency ratio assessment model for buses. *Transportation Research Procedia* 50 674-680. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.079.
11. Apatenco, A. S. Methods of recruiting of mobile repair services and maintenance of machines performing reclamation works / A. S. Apatenco, N. S. Sevryugina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyem - 2019, ISM 2019, Kazan, 12-13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012037. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012037.
12. Maintenance and repair management taking into account specialization, cooperation and unification within a united bus company consisting of several branches / N. V. Pozhivilov, V. A. Maksimov, G. A. Krylov, A. A. Zavgorodniy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012065. DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012065.
13. The calculation program of the technical service enterprise of transport-technological machines in agriculture / M. Buraev, P. Ilyin, S. Ilyin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, IC12AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. – Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012019. – DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012019.
14. Нгендакумана М., Ременцов А. Н. К вопросу оценки надежности автомобилей, выполняющих пассажирские перевозки в Бурунди // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1(64). С. 91-99.
15. Лерман Е. Б. Современные проблемы оценки экономической эффективности управления городским транспортом в крупном мегаполисе / Е. Б. Лерман // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2020. № 6. С. 211-214. DOI 10.23672/x2436-2587-0343-р.
16. Карабашева М. Р. Методы системного анализа в исследовании транспортных систем / М. Р. Карабашева // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. № 6. С. 15. EDN YXYTRB.
17. Жданов С.А. Экономические модели и методы в управлении / С.А. Жданов. М.: Издательство «Дело и Сервис», 1998. 176 с.
18. Бондаренко Е. В., Дрючин Д. А., Булатов С. В. Оценка целесообразности организации входного контроля качества запасных частей в условиях автотранспортного предприятия // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 71-78. DOI 10.25198/2077-7175-2021-2-71.
19. Крючков Е. Ю. Разработка паспорта планово-предупредительной системы проведения ТО и ТР для автобусов YUTONG на примере ТОО «Автобусный парк №3» г. Караганды / Е. Ю. Крючков, С. Ж. Кабикенов, Т. С. Интыков // Труды университета. 2020. № 3(80). С. 97-101.
20. Шипов Н. В. Применение планово-предупредительного ремонта при эксплуатации линейных городских автобусов / Н. В. Шипов, В. А. Максимов, Н. В. Поживилов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 1. С. 77-83. DOI 10.15593/24111678/2021.01.10.
21. Тузов Н. С. Техническая подготовка производства технического обслуживания и ремонта автобусов - основа эффективности / Н. С. Тузов, Е. В. Попов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1. № 3. С. 216-220.

22. Бойко Н. Е. Повышение эффективности функционирования автотранспортного предприятия на базе системного подхода к управлению службой ремонта / Н. Е. Бойко, Е. А. Калинина // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2019. Т. 2. № 1. С. 49-59.

23. Шиловский В. Н. Методические основы обоснования мощностей объекта технического сервиса / В. Н. Шиловский, Г. Ю. Гольштейн // Resources and Technology. 2020. Т. 17. № 4. С. 95-106. DOI 10.15393/j2.art.2020.5462.

24. Клейнер Б. С. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. Организация и управление / Б.С. Клейнер, В.В. Тарасов. М.: Транспорт, 1986. 237 с.

25. Денисов А. С. Совершенствование сервиса автобусов в условиях мегаполисов / А. С. Денисов, Е. В. Феклин; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. – 160 с. ISBN 978-5-7433-3378-3.

26. Пестриков С. А., Шумков А. Г. Методика оценки эффективности организации технического обслуживания и ремонта на примере транспортного подразделения филиала ОАО «МРСК Урала» - «Пермэнерго» // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2019. №1. С 233-244.

27. Халиуллин Ф. Х. Влияние технического состояния автотранспортных средств на периодичность их обслуживания / Ф. Х. Халиуллин, Р. А. Яковлев, А. В. Матяшин [и др.] // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 170-174. EDN PQCUNU.

REFERENCES

1. Boryaev, A., Malygin, I., & Marusin, A. (2020). Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport. Transportation Research Procedia 50 68-76. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.009.

2. Chernyaev, I., Oleshchenko, E., & Danilov, I. (2020). Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation. Transportation Research Procedia 50 77-85. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.010.

3. Grayevskiy, I., Marusin, A., & Marusin, A. (2020). CDF simulation-based research of influence of mechanical defects in nozzles on environmental parameters of automotive diesel engines. Transportation Research Procedia 50 182-191. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.023.

4. Kapustin, A., Vorobiev, S., Gordienko, V., & Marusin, A. (2020). Method for improving the safety of diesel vehicles when operating on gas engine fuel (gas diesel engines). Transportation Research Procedia 50 226-233. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.028.

5. Malshakov, A., & Akzholov, A. (2020). Method to determine required amount of spare parts for air suspension in large-size buses. Transportation Research Procedia 50 414-421. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.049.

6. Rakov, V. (2020). Determination of optimal characteristics of braking energy recovery system in vehicles operating in urban conditions. Transportation Research Procedia 50 566-573. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.068.

7. Rakov, V., Kapustin, A., & Danilov, I. (2020). Study of braking energy recovery impact on cost-efficiency and environmental safety of vehicle. Transportation Research Procedia 50 559-565. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.067.

8. Repin, S., Bukirov, R., & Vasilieva, P. (2020). Study on effects of damping characteristics of base chassis suspension on operational safety of transport and handling machinery. Transportation Research Procedia 50 574-581. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.069.

9. Lobanova, Y., & Evtukov, S. (2020). Role and methods of accident ability diagnosis in ensuring traffic safety. Transportation Research Procedia 50 363-372. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.043.

10. Taysayev, K., Terentyev, A., Evtukov, S., & Arifullin, I. (2020). Efficiency ratio assessment model for buses. Transportation Research Procedia 50 674-680. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.079.

11. Apatenco, A. S. Methods of recruiting of mobile repair services and maintenance of machines performing reclamation works / A. S. Apatenco, N. S. Sevryugina // 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. 012037. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012037.

12. Maintenance and repair management taking into account specialization, cooperation and unification within a united bus company consisting of several branches / N. V. Pozhivilov, V. A. Maksimov, G. A. Krylov, A. A. Zavgorodniy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012065. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012065.

13. The calculation program of the technical service enterprise of transport-technological machines in agriculture / M. Buraev, P. Ilyin, S. Ilyin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. – Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012019. – DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012019.

14. Ngendakumana M., Remencov A. N. K vo-prosu ocenki nadezhnosti avtomobilej, vypolnjajushhih passazhirskie perevozki v Burundi [On the issue of assessing the reliability of vehicles performing passenger transportation in Burundi]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*. 2021; 1(64): 91-99. (In Russ.)

15. Lerman E. B. Sovremennye problemy ocenki jekonomicheskoy jeffektivnosti upravlenija gorodskim transportom v krupnom megapolise [Modern problems of assessing the economic efficiency of urban transport management in a large metropolis]. *Gumanitarnye, social'no-jekonomicheskie i obshhestvennye nauki*. 2020; 6: 211-214. DOI 10.23672/x2436-2587-0343-p. (In Russ.)
16. Karabasheva M. R. Metody sistemnogo analiza v issledovanii transportnyh sistem [Methods of system analysis in the study of transport systems / M. R. Karabasheva]. *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2018; T. 10. № 6: 15. EDN YXYTRB. (In Russ.)
17. Zhdanov S. A. *Jekonomicheskie modeli i metody v upravlenii* [Economic models and methods in management]. Moscow, Izdatel'stvo «Delo i Servis», 1998. 176 p. (In Russ.)
18. Bondarenko E. V., Drjuchin D. A., Bulatov S. V. Ocenka celesoobraznosti organizacii vhodnogo kontrolja kachestva zapasnyh chastej v uslovijah avtotransportnogo predprijatija [Assessment of expediency of organization of input quality control of spare parts in the conditions of motor transport enterprise]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2021; 2: 71-78. DOI 10.25198/2077-7175-2021-2-71. (In Russ.)
19. Krjuchkov E. Ju., Kabikenov S. Zh., Intykov T. S. Razrabotka pasporta planovo-predupreditel'noj sistemy provedenija TO i TR dlja avtobusov YUTONG na primere TOO «Avtobusnyj park №3» g. Karagandy [Development of a passport of preventive maintenance and repair for buses YUTONG on the example of LLP «Bus Park 13» Karaganda]. *Trudy universiteta*. 2020; 3(80): 97-101. (In Russ.)
20. Shipov N. V., Maksimov V. A., Pozhivilov N. V. Primenenie planovo-predupreditel'nogo remonta pri ekspluatcii linejnyh gorodskih avtobusov [The use of preventive maintenance in the operation of linear city buses]. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*. 2021; 1: 77-83. DOI 10.15593/24111678/2021.01.10.
21. Tuzov N. S., Popov E. V. Tehniceskaja podgotovka proizvodstva tehničeskogo obsluzhivanija i remonta avtobusov - osnova jeffektivnosti [Technical preparation of bus maintenance and repair - the basis of efficiency]. *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2019; T. 1. № 3: 216-220. (In Russ.)
22. Bojko N. E., Kalinina E. A. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija avtotransportnogo predprijatija na baze sistemnogo podhoda k upravleniju sluzhboj remonta [Improving the efficiency of a motor transport enterprise on the basis of a systematic approach to managing the repair service]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishheva*. 2019; T. 2. № 1: 49-59. (In Russ.)
23. Shilovskij V. N., Gol'shtejn G. Ju. Metodicheskie osnovy obosnovanija moshhnostej ob'ekta tehničeskogo servisa [Methodological bases of justification of capacity of the object of technical service]. *Resources and Technology*. 2020; T. 17. № 4: 95-106. DOI 10.15393/j2.art.2020.5462. (In Russ.)
24. Klejner B. S., Tarasov V. V. Tehniceskoe obsluzhivanie i remont avtomobilej. Organizacija i upravlenie [Maintenance and repair of cars. Organization and management]. Moscow, Transport, 1986: 237. (In Russ.)
25. Denisov A. S., Feklin E. V. *Sovershenstvovanie servisa avtobusov v uslovijah megapolisov* [Improvement of bus service in megapolis conditions]. Saratovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni Gagarina Ju. A. Saratov: Saratovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni Gagarina Ju. A., 2020: 160. ISBN 978-5-7433-3378-3. (In Russ.)
26. Pestrikov S. A., Shumkov A. G. Metodika ocenki jeffektivnosti organizacii tehničeskogo obsluzhivanija i remonta na primere transportnogo podrazdelenija filiala OAO «MRSK Urala» - «Permenergo» [Methodology for assessing the effectiveness of maintenance and repair organization on the example of the transport division of the branch of JSC «MRSK Urals» - «Permenergo»]. *Vestnik PNIPU. Social'no-jekonomicheskie nauki*. 2019;1: 233-244. (In Russ.)
27. Haliullin F. H., Jakovlev R. A., Matjashin A. V. Vlijanie tehničeskogo sostojanija avtotransportnyh sredstv na periodichnost' ih obsluzhivanija [Influence of technical condition of motor vehicles on the frequency of their maintenance]. *Innovacii i investicii*. 2021; 7: 170-174. EDN PQCUNU.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Денисов А. С. Формирование направления исследования, цели и задач, научной новизны, описание математической модели и методов, результатов исследований в части разработки системы централизованных специализированных производств по проведению ТОиР. (40%).

Феклин Е. В. Формирование направления исследования, цели и задач, научной новизны, описание математической модели и методов, результатов исследований в части исследования факторов, влияющих на коэффициент технической готовности в рамках разрабатываемой системы централизованных специализированных производств (35%).

Игнатов А. В. Описание математической модели и методов, результатов исследований в части статистической обработки первичной информации, полученной от пассажирских предприятий автомобильного транспорта Саратовской области (25%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander S. Denisov. Formation of research area, goal and objectives, scientific novelty, description of mathematical model and methods, research results in terms of development of centralised specialised production system for maintenance and repair. (40%).

Evgeny V. Feklin. Formation of research area, goals and objectives, scientific novelty, description of mathematical model and methods, research results

in terms of research of factors affecting the technical availability factor within the developed system of centralised specialised production (35%).

Anton V. Ignatov. Description of mathematical model and methods, research results in the part of statistical processing of primary information received from passenger enterprises of motor transport of Saratov region (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Денисов Александр Сергеевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей».

Феклин Евгений Викторович – канд. экон. наук, доц., доц. кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей».

Игнатов Антон Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Denisov – Dr. of Sci., Professor, Transport Organisation, Traffic Safety and Vehicle Service Department.

Evgeny V. Feklin – Cand. of Sci., Associate Professor, Transport Organisation, Traffic Safety and Vehicle Service Department.

Anton V. Ignatov – Cand. of Sci., Associate Professor, Transport Organisation, Traffic Safety and Vehicle Service Department.

УДК 621.892.28
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>
EDN: NHXNIV
Научная статья



ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИ ЗИМНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

С. В. Корнеев^{1,2}, С. В. Пашукевич^{2*}, В. Д. Бакулина², Н. Г. Певнев¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

²Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

г. Омск, Россия

svkorneev51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7243-1841>

sofia96@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

ver-bakulina81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6219-0506>

pevnev_ng@sibadi.org, <https://orcid.org/0000-0003-4308-7604>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Надежность и срок службы двигателя во многом зависят от качества моторного масла. Без масла с надлежащим уровнем работоспособности двигатель внутреннего сгорания может страдать от износа, который во многих случаях приводит к отказу двигателя. Одним из факторов потери уровня качества моторного масла является его загрязнение. К примеру, кинематическая вязкость будет постепенно увеличиваться по мере того, как масло в двигателе начнет загрязняться сажей, грязью и иламом; или же оно может быть окислено. Если вязкость моторного масла слишком высока, двигатель должен совершать дополнительную работу для преодоления повышенного вязкостного сопротивления. Разбавление топливом и водой является одним из наиболее частых загрязнений в дизельных двигателях.

Материалы и методы. В работе приведены результаты исследования совокупного влияния воды и дизельного топлива на синтетическое моторное масло при различных их концентрациях. Оценка влияния загрязнений на изменение характеристик работоспособности смазочного материала, таких как кинематическая вязкость при 40 °C (измерение проводилось на автоматическом вискозиметре Штабингера SVM 3000), щелочное и кислотное число (значения получены с помощью автоматического титратора Titroline Alpha 20 Plus), а также измерение концентрации элементов-индикаторов моторного масла на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой серии iCAP 7000.

Выводы. Наличие в моторном масле загрязнений приводит к росту кинематической вязкости, при эксплуатации моторного масла значение его щелочного числа становится меньше, а значение кислотного, наоборот, прирастает. Заменять моторные масла необходимо при снижении щелочного числа на 50% или по балансу щелочного и кислотного чисел.

Рамки исследования/возможность. Такого вида моделирование эксплуатационных воздействий низких температур позволяет понять, какова динамика ухудшения состояния масла и оценить изменение его работоспособности в процессе использования.

Оригинальность/ценность. Проведенное исследование может являться основой для разработки рекомендаций по совершенствованию технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания для предприятий, имеющих в своем распоряжении автомобили с дизельными двигателями с целью увеличения ресурса силовых агрегатов и сокращения эксплуатационных затрат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторное масло, дизельное топливо, кинематическая вязкость, кислотное число, щелочное число.

Статья поступила в редакцию 27.06.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Корнеев С. В., Пашукевич С. В., Бакулина В. Д., Певнев Н. Г. Загрязнение моторных масел при зимней эксплуатации автомобилей // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 680-691. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>

© Корнеев С. В., Пашукевич С. В., Бакулина В. Д., Певнев Н. Г., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>

EDN: NHXNIV

CONTAMINATION OF ENGINE OILS DURING WINTER VEHICLE OPERATION

Sergey V. Korneev^{1,2}, Sophia V. Pashukevich^{2*}, Vera D. Bakulina², Nikolay G. Pevnev¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

²Omsk State Technical University
Omsk, Russia

svkorneev51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7243-1841>

sofia96@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

ver-bakulina81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6219-0506>

pevnev_ng@sibadi.org, <https://orcid.org/0000-0003-4308-7604>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The reliability and service life of an engine is largely dependent on the quality of the engine oil. Without oil at the proper level of performance, an internal combustion engine can suffer from wear and tear, which in many cases can lead to engine failure. One of the factors in the loss of the quality level of engine oil is its contamination. For example, kinematic viscosity will gradually increase as the engine oil becomes contaminated with soot, dirt and sludge; or it may be oxidized. If the viscosity of the engine oil is too high, the engine must do extra work to overcome the increased viscosity resistance.

Fuel and water dilution is one of the most common contaminants in diesel engines.

Materials and Methods. The paper presents the results of a study of the combined effect of water and diesel fuel on synthetic engine oil at their various concentrations. The influence evaluation of contaminants on changes in the performance characteristics of the lubricant, such as: kinematic viscosity at 40 ° C (measurement was carried out on an automatic Stabinger SVM 3000 viscometer), base and acid numbers (values obtained using an automatic Titroline Alpha 20 Plus titrator), as well as concentration measurement elements - indicators of engine oil on an optical emission spectrometer with inductively coupled plasma of the iCAP 7000 series.

Conclusions. The presence of contaminants in the engine oil leads to an increase in kinematic viscosity, during the operation of the engine oil, the value of its base number becomes less, and the value of the acid, on the contrary, increases. It is necessary to replace engine oils when the base number decreases by 50% or according to the balance of base and acid numbers.

Scope of Study/Opportunity. This type of low temperature performance modelling provides insight into how the oil deteriorates and evaluates the change in oil performance during use.

Originality / value. The study can be the basis for developing recommendations for improving the maintenance of internal combustion engines for enterprises that have cars with diesel engines at their disposal in order to increase the resource of power units and reduce operating costs.

KEYWORDS: engine oil, diesel fuel, kinematic viscosity, acid number, base number.

The article was submitted 27.06.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Sergey V. Korneev, Sophia V. Pashukevich, Vera D. Bakulina, Nikolay G. Pevnev Contamination of engine oils during winter vehicle operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 680-691. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>

© Korneev S. V., Pashukevich S. V., Bakulina V. D., Pevnev N. G., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Основное назначение моторного масла – это обеспечение смазывания пар трения двигателей. Таким образом, моторное масло уменьшает внутренние механические потери на трение в двигателе, но, кроме этого, оно обеспечивает охлаждение движущихся частей двигателя, поскольку рассеивает тепло; поддерживает чистоту поверхностей двигателя; предотвращает коррозию и ржавчину; помогает легко запускать двигатели внутреннего сгорания даже при низких температурах; защищает систему выбросов отработанных газов; помогает повысить экономию топлива, так как действует как заполнитель зазора между поршнем и цилиндром и тем самым герметизирует камеру сгорания, что помогает повысить эффективность и производительность двигателя [1].

Во время воздействия высокой температуры на моторное масло, при наличии кислорода, существует риск того, что масло вступит в реакцию с кислородом с образованием органических соединений, в том числе и кислот, которые могут вызывать химический износ и образование различных отложений на деталях двигателя [2].

Автомобильные смазочные материалы защищены от окисления за счёт введения антиоксидантных добавок, которые реагируют с кислородом и, таким образом, уменьшают вероятность того, что кислород прореагирует с основой масла. Кроме того, щелочные добавки (детергентные присадки) в масле нейтрализуют минеральные и органические кислоты, которые могут образовываться [3].

Основа смазочного материала выполняет важную функцию: транспортировка различных защитных химических добавок на участки, на которых они необходимы, и отвод нежелательных продуктов от мест, где они образуются.

Например, моторное масло транспортирует противоизносные поверхностно-активные агенты к носу кулачка на распределительном валу, область, в которой химические вещества необходимы для защиты от износа, когда толкатель скользит по носу кулачка. Защитные противоизносные агенты не так критичны, когда используется роликовый толкатель, чем скользящий контакт [4].

Разнообразие функций автомобильных компонентов сильно влияет на характеристики смазочного материала, необходимых для благоприятного использования.

При зимней эксплуатации двигателей автомобилей существует несколько проблем,

которые нужно учитывать при разработке и применении моторных масел. Учитывать вязкостно-температурную характеристику масел научились, но не учитывают некоторые особенности воздействия на моторные масла низких температур. Одна из главных проблем, связанная с образованием низкотемпературных шламов, – это поступление воды в масло. Вода накапливается в результате конденсационных процессов при запуске холодного двигателя из-за поступления газов из камеры сгорания в картер. При длительной работе двигателя и прогреве масла вода может выпариваться [5].

Вторым значительным загрязнителем моторного масла в зимнее время года является топливо. Топливо попадает в моторное масло из камеры сгорания через зазоры в цилиндро-поршневой группе в результате увеличения длительности прокрутки коленчатого вала до запуска двигателя. Кроме этого, при низких температурах увеличивается период задержки воспламенения, что тоже способствует поступлению топлива в моторное масло из-за несвоевременного и неполного сгорания топлива [6].

Отложения в двигателях внутреннего сгорания. В дизельных двигателях используют либо впрыск под углом впрыск (IDI), либо прямой впрыск (DI) топлива. В прошлом IDI использовался для небольших дизельных двигателей. Тем не менее большинство современных двигателей перешли на прямой впрыск, который более экономичен. Топливо впрыскивается в горячий сжатый воздух, где оно самовоспламеняется. Для обеспечения полноты сгорания и низкого процента выбросов при распылении топливовоздушной смеси важен контроль соотношения топлива и воздуха [7].

Для плавного сгорания в современных дизельных двигателях первоначально впрыскивается небольшое количество топлива, чтобы начать воспламенение. Затем следует постепенный впрыск топлива в горящую смесь. Этот подход требует очень точной конструкции форсунки. Хорошее распыление необходимо для тщательного перемешивания воздушной массы и топлива, что обеспечивает плавное сгорание. Соответственно, чистые топливные форсунки имеют решающее значение для эффективной работы дизельного двигателя. Топливная форсунка является высокоточным изделием, которое предназначено для дозирования дизельного топлива с высокой степенью точности. Распылитель форсунки находится в прямом контакте с зоной сгорания и любые отложения в этом месте могут значительно изменить её производительность [8].

Суперчистые распылители стали важным требованием в современном дизельном двигателе, поскольку системы впрыска под высоким давлением все чаще используются как в маломощных, так и в моторах большой мощности. Производительность дизельного двигателя по мощности, расход топлива и выбросы зависят в основном от чистоты форсунки, поскольку чрезмерные отложения нарушают форму распыления и затрудняют подачу топлива. Горюче-смазочные материалы могут образовывать отложения в области сопел топливной форсунки, которые подвергаются воздействию высоких температур при сгорании топлива. Состав отложений зависит от состава топлива, конструкции двигателя, состава смазки и рабочих параметров [9].

Как уже упоминалось выше, на концах топливных форсунок образуются отложения за счет образования кокса у отверстий для распыления топлива. Эти отложения замедляют реакцию топливной форсунки и могут вызвать прилипание движущихся внутренних частей. Результатом является потеря контроля времени функционирования форсунки и количества топлива, поставленного за один выпуск. В результате автомобиль будет испытывать работу двигателя с перебоями, а также нежелательные колебания мощности и потерю экономии топлива, помимо других проблем управляемости двигателем ещё это способствует поступлению топлива в моторное масло [10].

Сажа является наиболее вредным загрязнителем в современных дизельных двигателях. Она генерируется во время процесса неполного сгорания топлива и может попадать в масло через зазоры в цилиндро-поршневой группе. Даже в современных дизельных двигателях, отвечающих последним нормам выбросов, уровень сажи может достигать 5% или более. При длительной эксплуатации масла и наличии рециркуляции картерных газов (EGR) уровень сажи становится выше [11].

В дизельных двигателях с непосредственным впрыском время для испарения топлива и смешения с воздухом значительно короче. Поэтому сжигание богатых топливом смесей может быть неполным, что приводит к образованию сажи в дизельных двигателях DI.

Контроль отложений в двигателе является фундаментальной необходимостью для обеспечения длительного срока службы и эффективности работы двигателя. Образование отложений зависит от конструкции двигателя, условий эксплуатации, технического обслуживания, типа топлива и сгорания, а также от характеристик масла. Отложения влияют на мощность двигателя и его производительность, износ, шум, плавность, экономичность, срок службы и стоимость обслуживания. Наглядно усугубляющее воздействие загрязненных моторных масел на детали двигателя можно продемонстрировать с помощью рисунков 1 и 2.



Рисунок 1 – Отложения на стенках ротора фильтра центробежной очистки
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Sediments on the walls of the centrifugal filter rotor
Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Отложения на поверхностях деталей цилиндро-поршневой группы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Sediments on the surfaces of parts of the cylinder-piston group
Source: compiled by the authors.

Двумя важнейшими источниками отложений в двигателе являются: попадание грязи с топливом и воздухом для горения, а также сам процесс сгорания топлива. Грязь в воздухе или топливе вызывает абразивный износ. Отложения на поршневых коронках в кольцевых канавках и на клапанах состоят из твердых остатков от сгорания, такие как топливная сажа, смазочное масло на различных стадиях разложения и остатки от присадок к моторным маслам. Важно отметить, что любой анализ отложений двигателя покажет наличие металлов-индикаторов присадок, вводимых в моторные масла [12, 13, 14].

Температура в зоне горения высокая; таким образом, продолжающееся воздействие на моторное масло в этой области вызывает его окисление, деструкцию и полимеризацию в более тяжелые углеводороды. В зоне сгорания может находиться избыточное количество масла, достигающего верхней области цилиндра [15].

Другими возможными причинами являются неисправности топливной системы, неподходящие виды топлива, которые вызывают менее полное сгорание, плохое зажигание, не-

исправные или изношенные направляющие клапаны или изношенные цилиндры и кольца [16].

Отложения в кольцевых канавках по происхождению сходны с отложениями в камерах сгорания, но из-за того, что они не подвергаются прямому пламени горения, они могут быть более насыщены углеродом [17].

В нижней части поршней (более холодные участки) отложения имеют тенденцию к более высокому содержанию масла. В тяжелых случаях отложения в кольцевых канавках могут быть так плотны в зазорах позади компрессионных поршневых колец, что кольца теряют подвижность. При потере подвижности поршневых колец (залегании) нарушается герметичность камеры сгорания, а это приводит к уменьшению компрессии, интенсивному поступлению газов и топлива в картер и в моторное масло [18].

Лаковые отложения на поршне также могут быть образованы из продуктов разложения топлива и масла. Эти отложения могут отличаться более гладким, блестящим, почти прозрачным покрытием, часто называемые лаком, и изменяться до темного непрозрачного вида,

которое становится все более насыщенным углеродом в процессе использования масла [19].

Иногда наблюдаются отложения на клапанах. Это результат разложения продуктов сгорания как топлива, так и масла, они образуются аналогично отложениям в камере сгорания. На впускных клапанах может быть больше отложений, чем на выпускных, особенно когда они интенсивно охлаждаются при работе с низкими нагрузками. При таких условиях есть большая вероятность попадания капель топлива и веществ от EGR, образующих смолы на стержнях клапанов, в моторное масло. Грязь и твердые загрязнители будут прилипать к этим липким отложениям. В некоторых конструкциях двигателей с верхним расположением клапанов масло попадает во впускной коллектор, затем в камеру сгорания, не сгорает полностью, но значительно окисляется до многих радикалов и попадает с просочившимися картерными газами в картер, что ускоряет образование отложений [20].

Другим основным типом отложений являются эмульсия и шлам, образованные водой, разложением топливных остатков и твердых остатков. Шлам обычно оседает на более холодных поверхностях двигателя, таких как дно поддона картера, клапанные камеры и верх головки цилиндров. Основная проблема состоит в том, что этот тип отложений может быть собран моторным маслом и перенесен в такие области, как масляный насос, впускной клапан или масляные каналы, где он может препятствовать прохождению потока масла и вызывать сбой режима смазки [21].

Хотя внешний вид отложений в двигателе сильно различается, в основном эти отложения являются результатом процессов сгорания и деградации углеводородов.

Вода является негативным фактором, а свойства, которые способствуют удержанию воды в моторном масле, приводят к образованию шлама [22].

Качество обслуживания двигателя, которое влияет на процесс смазывания подвижных деталей, имеет большое значение. Необходимо иметь чистый воздух для сгорания и вентиляции картера, это означает, что воздушные фильтры и система принудительной вентиляции картера должны регулярно обслуживаться. Засоренный воздушный фильтр, хотя он может эффективно очищать воздух от механических примесей, но может и ограничивать подаваемый в цилиндры объем воздуха, доводя двигатель до такого состояния,

что выходная мощность может значительно снизиться, так как кислорода может не хватать для полного окисления топлива. Это особенно актуально при значительной подаче топлива на переходных режимах работы двигателя. Дизельные двигатели довольно чувствительны к такому состоянию, а это может привести к большому количеству дыма, быстрому накоплению отложений в двигателе и увеличению сажи в масле. В дополнение к этому при обслуживании фильтров важно, чтобы трубопровод, соединяющий фильтр с двигателем, был герметичным и не имел подсоса из внешней среды [23].

Работавшее масло из двигателя внутреннего сгорания поршневого типа представляет собой смесь продуктов сильного окисления топлива и базового масла, которое окисляется относительно медленно в сравнении с алканами топлива. Изменения в масле особенно характерны для дизельных двигателей, где масло после эксплуатации содержит такие продукты глубокой окислительной конверсии, как нагар и смолистые вещества. Изменение температуры масла в картере в пределах всего 80–140 °C уже дает начальную степень окисления. Если объем системы смазки двигателя уменьшается, концентрация продуктов окисления в масле увеличивается значительно быстрее [24].

Проведение эксперимента. Данный эксперимент проводили на приборе АПСМ-1М, а непосредственное окисление происходило в вакуумметрах ВТИ с использованием кислорода в присутствии катализатора (рисунок 3).

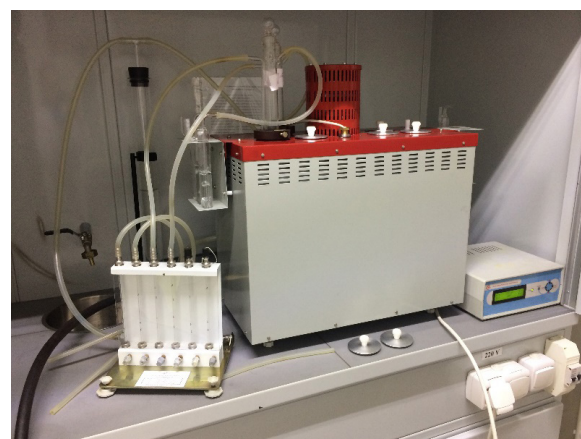


Рисунок 3 – Прибор АПСМ-1М для определения стабильности против окисления нефтяных масел
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – APSM-1M appliance for determining the stability against oxidation of petroleum oils
Source: compiled by the authors.

В связи с тем, что конструкция данного прибора не позволяет проводить эксперимент при наличии кипящей воды, температура эксперимента, основываясь на температурном режиме основной системы циркуляции масла, была выбрана при значении 95 °C.

Окисление проводилось в течение 5 ч, концентрации дизельного топлива и воды были выбраны следующими:

1. 99,1 г. моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 +0,3%ДТ +0,6% воды;
2. 98,5 г. моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 +0,5%ДТ +1% воды;
3. 99,5 г. моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 +0,1%ДТ +0,4% воды.

После выполнения окисления моторному маслу с дизельным топливом и водой дали время остыть, затем перелили в небольшие емкости (рисунок 4), после чего оно отстаивалось в течение суток.



Рисунок 4 – Результат окисления моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 с различными концентрациями дизельного топлива и воды при 95 °C и в течение 5 ч
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The result of the oxidation of Gazpromneft Diesel Ultra 10W-40 engine oil with various concentrations of diesel fuel and water at 95°C and for 5 hours
Source: compiled by the authors.

Видно, что чем выше концентрация воды в моторном масле, тем больше в образцах образуется низкотемпературного шлама, наличие которого является крайне нежелательным условием для поверхностей подвижных деталей двигателя. Эта ситуация является типичной для автомобильной техники, оснащенной дизельными двигателями, потому анализ таких характеристик работоспособности, как кинематическая вязкость при 40 °C, кислотное число, щелочное число и определение количества элементов-индикаторов присадок, содержащихся в моторном масле, выглядит целесообразным и обоснованным.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как правило, вязкость считается тестом с запаздывающим индикатором, означающим, что что-то случилось, что вызвало изменение вязкости масла. Чаще всего использование масла неправильной марки является причиной внезапного и значительного изменения вязкости, но другие основные причины включают потерю вязкости, изменение индекса вязкости, при деструкции загустителя, или загрязнение водой, топливом или другими загрязнителями.

Чрезмерное тепло, влажность, воздействие воздуха и повышенные концентрации металлов (выступающие в качестве катализаторов) могут привести к окислению масла, что также приведет к изменению вязкости.

Увеличение вязкости масла, полученное в этом испытании, указывает на склонность масла к окислению (рисунок 5). Помимо этого загрязнение частицами сажи, а также значимым объемом воды и топлива может повлечь за собой достаточно резкое изменение кинематической вязкости.

Если моторное масло окисляется, то его цвет становится темнее, а значение кислотного числа увеличивается из-за создания осадка, шлама и лака. Кислотное число является показателем работоспособности масла, он полезен для мониторинга накопления кислоты в маслах из-за истощения антиоксидантов. Окисление масла вызывает образование кислых побочных продуктов. Высокие уровни органических кислот могут указывать на чрезмерное окисление масла или истощение антиокислительных присадок и могут привести к коррозии деталей двигателя. Контролируя значение кислотного числа, моторное масло должно быть заменено при достижении предельных значений и до того, как произойдет какое-либо повреждение двигателя. Поскольку антиоксиданты могут находиться в шламах, а это приведет к тому, что образующиеся кислоты не будут нейтрализованы и их концентрация начнет быстро увеличиваться. Отслеживая результаты по кислотному числу, можно определить уровень работоспособности смазочного материала (рисунок 6).

Для борьбы с окислением в масле используются антиоксиданты. Они останавливают свободнорадикальные реакции, которые атакуют связь углерод-водород и разрушают базовое масло, создавая тем самым более высокий уровень окисления и повышая потребность в детергентных (моющих) присадках для удаления отложений.



Рисунок 5 – Сравнительные значения кинематической вязкости окисленного моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W–40 с различными концентрациями дизельного топлива и воды
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparative values of the kinematic viscosity of the oxidized Gazpromneft Diesel Ultra 10W–40 engine oil with different concentrations of diesel fuel and water
Source: compiled by the authors.



Рисунок 6 – Сравнительные значения кислотных чисел окисленного моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W–40 с различными концентрациями дизельного топлива и воды
Источник: материалы соавторов.

Figure 6 – Comparative values of acid numbers of oxidized Gazpromneft Diesel Ultra 10W - 40 engine oil with various concentrations of diesel fuel and water
Source: compiled by the authors.

Детергентные присадки используются для очистки побочного продукта окисленного масла, который возникает, когда антиоксиданты не могут эффективно нейтрализовать кислоты, создавая химическую реакцию с осадком и предшественниками лака, чтобы нейтрализовать их и сохранить в растворимом состоянии.

Щелочное число не измеряет накопление продуктов окисления или антиоксидантов, а скорее измеряет истощение детергентов, присутствующих в моторном масле, для нейтра-

лизации кислотных картерных газов, которое происходит из-за низкого уровня антиоксидантов в масле. Поскольку моющий компонент расходуется в качестве нейтрализатора органических и минеральных кислот, щелочное число уменьшается по сравнению с его первоначальным значением у свежего масла. Мониторинг данного показателя позволяет заблаговременно пополнять масло или заменять до потери защиты, обеспечиваемой этой присадкой (рисунок 7).

Щелочное число



Рисунок 7 – Сравнительные значения кислотных чисел окисленного моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W–40 с различными концентрациями дизельного топлива и воды
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Comparative values of acid numbers of oxidized Gazpromneft Diesel Ultra 10W- 40 engine oil with different concentrations of diesel fuel and water
Source: compiled by the authors.

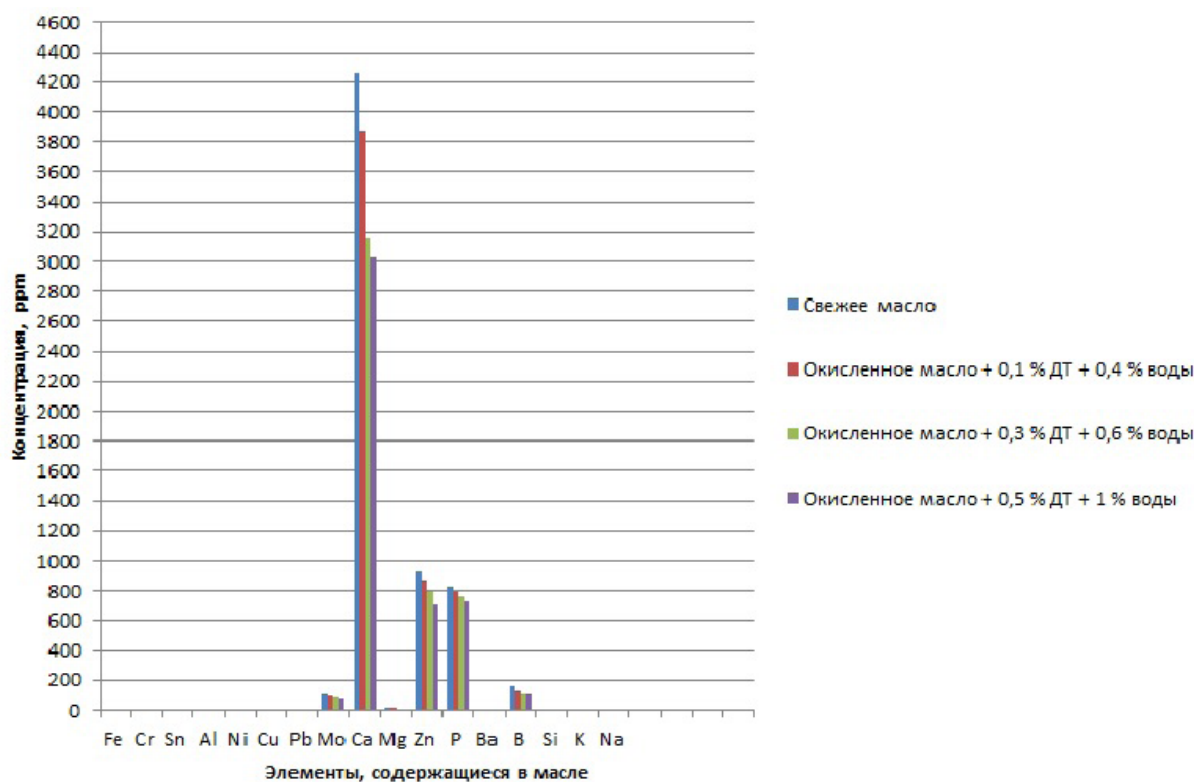


Рисунок 8 – Сравнительные значения концентрации элементов-индикаторов окисленного моторного масла Gazpromneft Diesel Ultra 10W – 40 с различными концентрациями дизельного топлива и воды
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Comparative values of the concentration of elements - indicators of oxidized Gazpromneft Diesel Ultra 10W – 40 engine oil with different concentrations of diesel fuel and water
Source: compiled by the authors.

Снижение концентрации молибдена в моторном масле влечет за собой проблемы, связанные с износом поршневых колец двигателя. Чем больше будет концентрация дизельного топлива и воды в моторном масле, тем сильнее упадет значение данного модификатора трения. Кальций, элемент-индикатор детергентной присадки, она помогает поверхностям подвижных деталей двигателя избавиться от крайне нежелательных отложений в виде нагара, лаковых отложений и прочего. Падение концентрации кальция в моторном масле также нежелательно и говорит о том, что основная функция масла – моющая – не находится на должном уровне. Таким же образом можно описать и действие магния, который в некоторых случаях борется с отложениями гораздо эффективнее, чем кальций. Цинк и фосфор являются важнейшими представителями противоизносных присадок для моторных масел, и необходимая их концентрация позволяет защитить от повреждения подвижные детали двигателя. Снижение их концентрации влечет за собой только негативные явления. Уменьшение значения содержания бора в моторном масле говорит о том, что моторное масло не на должном уровне снижает трение между частями двигателя в автомобильной технике. Для моторных масел очень небольшое количество кремнийорганических веществ, добавляемых в смазку, может значительно уменьшить пенообразование, но при спаде концентрации кремния должного пеногашения при эксплуатации двигателя достигнуто не будет (рисунок 8).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При зимней эксплуатации автомобилей наблюдается совокупное загрязнение моторных масел водой и дизельным топливом.

Сам факт, что в моторное масло попали дизельное топливо и вода, носит негативный характер, но это еще усугубляет процесс окисления в двигателях внутреннего сгорания. В совокупности это чревато тем, что возникают отложения, которые создают большие проблемы в дальнейшей эксплуатации автомобильной техники.

При окислении и старении смазочного материала образуются кислые побочные продукты в результате деструкции топлива, базовой основы и присадок в присутствии кислорода воздуха и тепла. Высокая концентрация кислотных соединений в смазочном материале может привести к коррозии деталей машин из-за загрязненного масла, нарушению работы фильтров из-за образования лака и шла-

ма. Это способствует образованию отложений на большинстве поверхностей двигателя, включая такие, которые могут вызвать потерю подвижности поршневых колец в канавках поршня.

Заменять моторные масла необходимо при снижении щелочного числа на 50% или по балансу щелочного и кислотного чисел.

По снижению концентрации элементов-индикаторов присадок в моторном масле можно судить о их срабатываемости и необходимости замены масла в двигателе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang Y., Zhuang Y., Yao M. Qin Y, Zheng Zh. An experimental investigation into the soot particle emissions at early injection timings in a single-cylinder research diesel engine. *Fuel*. 2022. 316: 123288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123288>.
2. Zhang Ch., Li Y., Liu Zh., Liu J. An investigation of the effect of plateau environment on the soot generation and oxidation in diesel engines. 2022. *Energy*. 253:124086. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124086>.
3. E. J., Xu W., Ma Y., Tan D., Peng Q., Tan Y., Chen L. Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review. *Fuel Processing Technology*. 2022. 235:107373, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107373>.
4. Wolak A., Molenda J., Zając G., Janocha P. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy. *Measurement*. 2021: 186.110141. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110141>.
5. Пашукевич С. В. Классификация загрязнителей моторных масел для дизельных двигателей. Вестник СибАДИ. 2022. № 1(83).С. 84–100. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-84-100.
6. Корнеев С. В. Влияние воды на изменение показателей качества моторного масла. Вестник СибАДИ. 2021. № 4(80). С. 406–415. DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-4-406-415.
7. Korneev S. V., Bakulina V. D., Yarmovich Y. V., Pashukevich S. V. Influence of base oils on changes in the performance characteristics of motor oils when exposed to high temperatures and diluted with fuel. AIP Conference Proceedings. 2021. 020001. DOI 10.1063/5.0075527.
8. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A.A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019.355: pp. 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>
9. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. 129: pp 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>.
10. Tormos B., Novella R., Gomez-Soriano J., García-Barberá A., Tsuji N., Uehara I., Alonso M. Study of the influence of emission control strategies on the

soot content and fuel dilution in engine oil. *Tribology International*. 2019. 136: pp. 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.066>.

11. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

12. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.

13. Huang Y., Ng E. C.Y., Yam Ya, Lee C. K.C., Surawski N. C., Mok W., Organ B., Zhou J. L., Chan E. F.C. Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck. *Energy Conversion and Management*. 2019. 184: pp. 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>.

14. Jamil A., Baharom M. B., Aziz A. R. A. IC engine in-cylinder cold-flow analysis – A critical review. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. 60: pp. 2921-2945. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.01.040>.

15. Yadav G., Tiwari S., Jain M.L. Tribological analysis of extreme pressure and anti-wear properties of engine lubricating oil using four ball tester. *Materials Today: Proceedings*. 2018. 5: pp. 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.079>.

16. Salehi F. M., Morina A., Neville A. The effect of soot and diesel contamination on wear and friction of engine oil pump. *Tribology International*. 2017. 115: pp. 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.041>.

17. Omar A. Al Sh., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160: 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>.

18. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. 2019. 40: pp. 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>.

19. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>.

20. Vrcek A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.

21. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO₂ and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.

22. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

23. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Ravarkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

24. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

REFERENCES

1. Wang Y., Zhuang Y., Yao M. Qin Y, Zheng Zh. An experimental investigation into the soot particle emissions at early injection timings in a single-cylinder research diesel engine. *Fuel*. 2022. 316: 123288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123288>.

2. Zhang Ch., Li Y., Liu Zh., Liu J. An investigation of the effect of plateau environment on the soot generation and oxidation in diesel engines. 2022. *Energy*. 253:124086. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124086>.

3. E. J., Xu W., Ma Y., Tan D., Peng Q., Tan Y., Chen L. Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review. *Fuel Processing Technology*. 2022. 235:107373. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107373>.

4. Wolak A., Molenda J., Zajac G., Janocha P. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy. *Measurement*. 2021: 186.110141. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110141>.

5. Pashukevich S.V. Classification of contaminants in diesel engine oils. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(1):84-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-84-100>.

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

7. Korneev S. V., Bakulina V. D., Yarmovich Y. V., Pashukevich S. V. Influence of base oils on changes in the performance characteristics of motor oils when exposed to high temperatures and diluted with fuel. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 020001. DOI 10.1063/5.0075527.

8. Esfe M. H., Esfandeh S., Arani A.A. A. Proposing a modified engine oil to reduce cold engine start damages and increase safety in high temperature operating conditions. *Powder Technology*. 2019.355: pp. 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.009>.

9. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tri-*

bology International. 2019. 129: pp 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>.

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

11. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161:107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>.

12. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262: 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.

13. Huang Y., Ng E. C.Y., Yam Ya, Lee C. K.C., Surawski N. C., Mok W., Organ B., Zhou J. L., Chan E. F.C. Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck. *Energy Conversion and Management*. 2019. 184: pp. 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>.

14. Jamil A., Baharom M. B., Aziz A. R. A. IC engine in-cylinder cold-flow analysis – A critical review. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. 60: pp. 2921-2945. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.01.040>.

15. Yadav G., Tiwari S., Jain M.L. Tribological analysis of extreme pressure and anti-wear properties of engine lubricating oil using four ball tester. *Materials Today: Proceedings*. 2018. 5: pp. 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.079>.

16. Salehi F. M., Morina A., Neville A. The effect of soot and diesel contamination on wear and friction of engine oil pump. *Tribology International*. 2017. 115: pp. 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.041>.

17. Omar A. Al Sh., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160: 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>.

18. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*. 2019. 40: pp. 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>.

19. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. *Engineering Failure Analysis*. 2020. vol. 116. pp. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>.

20. Vreck A., Hultqvist T., Baubet Y., Björling M., Marklund P., Larsson R. Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2019. 129: 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.032>.

21. Slavchov R. I., Salamanca M., Russo D., Salama I., Mosbach S., Clarke S. M., Kraft M., Lapkin A. A., Filip S.V. The role of NO₂ and NO in the mechanism of hydrocarbon degradation leading to carbonaceous deposits in engines. *Fuel*. 2020. 267:117218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117218>.

22. Ferraro G., Fratini E., Rausa R., Baglioni P. Impact of oil aging and composition on the morphology and structure of diesel soot. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. 512: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.033>.

23. Deulgaonkar V. R., Pawar K., Kudle P., Raverkar A., Raut A. Failure analysis of fuel pumps used for diesel engines in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2019. 105: 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.048>.

24. Venkatachalam G., Kumaravel A. Experimental Investigations on the Failure of Diesel Engine Piston. *Materials Today: Proceedings*. 2019. vol. 16. pp. 1196-1203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.214>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корнеев С. В. 25 %

Пашукевич С. В. 25 %

Бакулина В. Д. 25 %

Певнев Н. Г. 25 %

COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Sergey V. Korneev 25 %

Sophia V. Pashukevich 25 %

Vera D. Bakulina 25 %

Nikolay G. Pevnev 25 %

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Тепловые двигатели и авто-тракторное электрооборудование», проф. кафедры «Химия и химическая технология».

Пашукевич София Вячеславовна – аспирант группы Ма – 202 кафедры «Химия и химическая технология».

Бакулина Вера Дмитриевна – ассистент, инженер кафедры «Химия и химическая технология».

Певнев Николай Гаврилович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильный транспорт».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey V. Korneev – Doctor of Sci., Professor, Heat Engines and Motor and Tractor Equipment Department, Chemistry and Chemical Technology Department.

Sophia V. Pashukevich – Postgraduate student, Chemistry and Chemical Technology Department.

Vera D. Bakulina – Assistant, Engineer of the Chemistry and Chemical Technology Department.

Nikolay G. Pevnev Gavrilovich – Doctor of Sci., Professor, Department Automobile transport.

УДК 656.13.073.41:633.1(470.45+55)

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

EDN: PWWDLA

Научная статья



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПОСТАВКИ ЗЕРНА ИЗ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В ИРАН

А. В. Куликов^{1*}, Е. А. Близнякова¹, П. А. Павлов², А. А. Куликов¹¹Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия²ООО «Альфа Трейд»,
г. Москва, РоссияAlekseyKulikov2007@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4395-590X>el.44@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0143-8349>pavel-pavlov87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3420-3909>v2xoda@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5297-485X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе создана новая схема мультимодальной логистической системы перевозки зерна на экспорт в Иран с использованием звеньев и графов. Предлагается рассматривать функционирование автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе экспортной поставки зерна с позиции системного подхода на микро-, мезо- и макроуровне, опираясь на новое вводимое понятие транспортной емкости моделируемого графа. Для определения оптимальных режимов функционирования автомобильного транспорта (с дальнейшей целью повышения его эффективности функционирования) в логистических звеньях поставок экспортного зерна на микроуровне предлагается выполнять с помощью графа «Посевные поля – районные токи», на мезоуровне – графа «Районные токи – районные элеваторы», на макроуровне – графа «Районные элеваторы – портовые элеваторы». Моделирование графов, определение транспортной емкости вершин, закрепление вершин за токами, районными элеваторами и портовыми элеваторами создают возможность предприятиям агропромышленного комплекса планировать объем экспортной поставки зерна, рационально использовать свои посевные площади с учетом урожайности сельскохозяйственных культур при выполнении важных условий – обеспечения продовольственной безопасности населения РФ. Планирование работы автомобильного транспорта на микроуровне непосредственно связано с функционированием сельскохозяйственных предприятий, на мезоуровне – с элеваторами. На макроуровне автомобильный транспорт обслуживает три крупнейших портовых хлебоприемных пункта Волгоградской области. Организована мультимодальная перевозка зерна от конкретного хозяйства региона до порта Энзели в Иране с использованием автомобильного транспорта и судна река-море VOLGO-BALT 239.

Материалы и методы. В работе используются методы статистического анализа данных поставок озимой пшеницы на экспорт в Иран из Волгоградской области. На микроуровне применяются графо-аналитические методы для моделирования схем местоположения заполнения бункеров при работе в бригаде одного, трех или девяти комбайнов с указанием их номера появления на поле в координатной плоскости. Методы системного анализа применялись для правильного разделения международной мультимодальной логистической системы перевозки экспортного зерна на микро-, мезо- и макроуровни с определением места и роли транспорта. Методы решения задачи линейного программирования – оптимизация закрепления потребителей за поставщиками на всех рассматриваемых уровнях.

Результаты. Выявлено, что сложные международные мультимодальные логистические системы доставки экспортного зерна необходимо рассматривать с использованием системного подхода. Предлагается систему рассматривать на микро-, мезо- и макроуровнях. На каждом из уровней необходимо планировать работу транспорта, основанную на расчетах «транспортной емкости» вершин графов «Посевные поля – районные токи», «Районные токи – районные элеваторы», «Районные элеваторы –

© Куликов А. В., Близнякова Е. А., Павлов П. А., Куликов А. А., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

портовые элеваторы». Агропредприятие Волгоградской области ООО «Прогресс» получило возможность планировать свою работу с учетом новых информационных технологий, обеспечивающих более высокую эффективность сельскохозяйственной деятельности при возделывании озимой пшеницы с частичной реализацией на экспорт в Иран.

Обсуждение и заключение. Совершенствование организации функционирования автомобильного транспорта в международной мультимодальной логистической системе экспортных поставок зерна не может существовать без применения технологий точного земледелия в уборочно-транспортных процессах. Применение правильных логистических технологий на автомобильном транспорте и в организации возделывания озимой пшеницы оказывает большое влияние на конечную себестоимость зерна и на гарантированное обеспечение продовольственной безопасности РФ. Исследование в этом направлении в настоящее время является актуальным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системный подход, микроуровень, мезоуровень, макроуровень, мультимодальные логистические системы перевозки, точное земледелие, теория графов, моделирование транспортных процессов, возделывание озимой пшеницы, агропромышленные комплексы, зерновые тока, зерновые элеваторы, хлебоприемные порты, линейное программирование, транспортная задача, целевая функция, ограничения.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность агроному предприятия ООО «Прогресс» А. В. Близнякову за консультацию по вопросам моделирования графа посевных полей и возделыванию озимой пшеницы, а также благодарность анонимным рецензентам за рассмотрение данной статьи.

Статья поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 28.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Куликов А. В., Близнякова Е. А., Павлов П. А., Куликов А. А. Совершенствование организации функционирования автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе поставки зерна из Волгоградской области в Иран // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 692-715. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

EDN: PWWDLA

Original article

IMPROVEMENT OF ORGANISATION FOR ROAD TRANSPORT FUNCTIONING IN A MULTIMODAL LOGISTICS SYSTEM FOR GRAIN DELIVERY FROM VOLGOGRAD REGION TO IRAN

Alexey V. Kulikov^{1*}, Elena A. Bliznyakova¹, Pavel A. Pavlov², Andrey A. Kulikov¹

¹Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia

ООО ALFA TRADE, Moscow, Russia

AlekseyKulikov2007@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4395-590X>

el.44@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0143-8349>

pavel-pavlov87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3420-3909>

v2xoda@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5297-485X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The paper has developed a new scheme of a multimodal logistics system for grain transportation for export to Iran using links and graphs. It is proposed to consider the functioning of road transport in a multimodal logistics system for grain export from the standpoint of a systematic approach at the micro, meso and macro levels based on the newly introduced concept of transport capacity of the simulated graph. To determine the optimal

© Kulikov A. V., Bliznyakova E. A., Pavlov P. A., Kulikov A. A., 2022



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

modes of road transport functioning (with the further aim of increasing its efficiency of functioning) in the logistics links of export grain supplies at the micro level, it is proposed to perform using the 'Sowing fields – regional barn-floors' graph, at the meso level – the 'Regional barn-floors – regional grain storages' graph, at the macro level – the 'Regional grain storages – port grain storages' graph. Graphs modelling, determining the transport capacity of vertices, fixing vertices for barn-floors, regional grain storages and port grain storages make it possible for agro-industrial enterprises to plan the volume of grain exports, to use their acreage rationally considering crop yields while fulfilling an important condition - ensuring food security for the population of the Russian Federation. Road transport planning at the micro level is directly linked to the operation of agricultural enterprises, and at the meso level to grain storages. At the macro level, road transport serves the three largest port grain receiving points of the Volgograd region. Multimodal transportation of grain from a specific farm in the region to the port of Enzeli in Iran has been organized using road transport and VOLGO-BALT 239 river-sea vessel.

Materials and methods. The paper uses methods of statistical analysis of winter wheat supplies for export to Iran from the Volgograd region. At the micro level, graphoanalytic methods are used to model the location schemes of filling bunkers when working in a team of one, three or nine combines, indicating their number of appearance on the field in the xOy coordinate plane. The methods of system analysis were used to correctly divide the international multimodal logistics system for the transportation of export grain into micro, meso and macro levels with the definition of the place and role of transport. Methods of solving the linear programming problem are the optimization of the assignment of consumers to suppliers at all levels under consideration.

Results. It is revealed that complex international multimodal logistics systems for the delivery of export grain must be considered using a systematic approach. It is proposed to consider the system at the micro, meso and macro levels. At each of the levels, it is necessary to plan the operation of transport based on calculations of the 'transport capacity' of the 'Sowing fields – regional barn-floors', 'Regional barn-floors – regional grain storages', 'Regional grain storages – port grain storages' graph nodes. ООО Progress, the agro-enterprise of the Volgograd region, has been given the opportunity to plan its work taking into account new information technologies that ensure higher efficiency of agricultural activities in the cultivation of winter wheat with partial sale for export to Iran.

Discussion and conclusions. The improvement of the organisation of road transport functioning in the international multimodal logistics system of grain export supplies cannot exist without the use of precision farming technologies in harvesting and transport processes. The use of the right logistics technologies in road transport and in the organisation of winter wheat cultivation has a great impact on the final cost of grain and on the guaranteed food security of the Russian Federation. Research in this direction is currently relevant.

KEYWORDS: system approach, micro-level, meso-level, macro-level, multimodal logistics transportation systems, precision agriculture, graph theory, modelling of transport processes, winter wheat cultivation, agro-industrial complexes, grain barn-floors, grain storages, grain receiving ports, linear programming, transport task, objective function, constraints.

ACKNOWLEDGEMENTS: The editors express their gratitude to A.V. Bliznyakov, agronomist of ООО Progress enterprise for his advice on modelling the crop field graph and cultivation of winter wheat, and to thank the anonymous reviewers for their consideration of this article.

The article was submitted 14.06.2022; approved after reviewing 28.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Alexey V. Kulikov, Elena A. Bliznyakova, Pavel A. Pavlov, Andrey A. Kulikov Improvement of organisation for road transport functioning in a multimodal logistics system for grain delivery from Volgograd region to Iran // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 692-715. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

ВВЕДЕНИЕ

Волгоградская область входит в тройку лидеров по поставкам экспортной озимой пшеницы в страны Ближнего Востока, в частности в Иран. Последние десятилетия отмечаются устойчивые торговые связи области и Ирана. В настоящее время остро стоит проблема обеспечения внутренней продовольственной безопасности РФ и соблюдения договорных обязательств по поставке излишек зерна на экспорт. Целью работы является создание

современных методов организации функционирования автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе поставки зерна из Волгоградской области в Иран с использованием системного подхода. Для достижения поставленной цели разработаны и решены следующие задачи: исследованы научные труды, посвященные методам точного земледелия; рассмотрено моделирование работы уборочных комплексов на микроуровне для конкретного предприятия с учетом се-

вооборота за период 2016–2020 гг.; произведено моделирование графов международной мультимодальной логистической системы поставки экспортного зерна на микро-, мезо- и макроуровнях; определены транспортные емкости графов на всех уровнях с получением результатов решения задачи линейного программирования; предложены мероприятия по развитию исследований в области повышения работы автомобильного транспорта в международных мультимодальных логистических системах поставки зерна на экспорт.

Существует проблема в правильном формировании звеньев международной мультимодальной логистической системы перевозки зерна на экспорт и организацией планирования работы автомобильного транспорта. Что же можно считать звеном в этой логистической системе? Разрабатывая теорию графов именно для построения транспортных систем на микро-, мезо- и макроуровнях, необходимо определить план задания на будущую работу автомобильного транспорта. Первым звеном в системе является сбор урожая с посевных полей зерновых сельскохозяйственных культур (рисунок 1).

На микроуровне моделируется граф посевных полей, который обладает информацией о структуре и характеристике полей, данными о составе и режиме работы уборочно-транспортной бригады. Вершины графа – это поля, засеянные одной и той же сельскохозяйствен-

ной культурой и принадлежащие конкретной агроорганизации.

В понятие транспортной емкости графа посевных полей закладывается транспортная работа автомобилей в зависимости от организации их взаимодействия с комбайнами в составе уборочного комплекса в каждой вершине графа. В результате наблюдается зависимость между пробегом автомобильного транспорта от работы комбайнов, которую предлагается разделить на три варианта:

1) автомобили совершают большие пробеги, зачастую равные пробегу комбайна (автомобили закреплены за комбайнами своей бригады);

2) пробеги автомобиля сокращаются в два и более раз, когда автомобиль может подъезжать к любому комбайну с заполненным бункером;

3) пробеги автомобилей внутри вершины по полям минимальны, так как используются межоперационные или межсменные компенсаторы.

В зависимости от организации работы автомобильного транспорта внутри вершины изменяется время транспортного цикла, в частности, время погрузки (включающее время движения по полю). И чем это время меньше при неизменном значении времени транспортировки, разгрузки и подачи подвижного состава под погрузку, тем большее количество ездов совершает автомобиль за время в наряде.



Рисунок 1 – Схема мультимодальной логистической системы перевозки зерна на экспорт в Иран с указанием основных звеньев и графов
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of a multimodal logistics system for grain transportation for export to Iran, indicating the main links and graphs
Source: compiled by the authors.

В результате меньшее количество автомобилей потребуется для обеспечения вывоза собранного урожая на зерновой ток. Это все дает возможность планировать работу транспорта на микроуровне^{1, 2}.

Рациональная организация процессов возделывания сельскохозяйственных зерновых культур должна, с одной стороны, стремиться максимизировать урожайность, а с другой стороны, минимизировать антропогенное воздействие на окружающую среду. Главным из способов для достижения данной цели можно назвать применение ресурсосберегающих технологий, в частности, технологии точного земледелия и создания эффективных мультимодальных логистических систем. Планирование и последующая реализация производственных процессов в сельском хозяйстве на основании точного земледелия даст возможность получения максимальной прибыли при минимальном негативном влиянии на биосферу с сохранением качества возделываемого зерна.

Известно, что основанием для формирования технологии точного земледелия явилось создание в конце 1970-х гг. глобальных систем позиционирования. Однако ввиду недостаточной эффективности функционирования GPS и ГЛОНАСС новаторская технология не была точной и надежной^{3, 4}. Новый этап в разработке координатного земледелия начался в 2007 г., когда в Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева впервые был создан Центр точного земледелия. Научная деятельность Центра связана с изучением и сравнением точного и традиционного земледелия [1]. Однако в научных работах вопросу

о повышении эффективности функционирования автомобильного транспорта уделялось малое значение.

Исследование технологии точного земледелия представляет собой острый научный интерес для ученых страны. Опыт разработки геоинформационной системы для обеспечения функционирования системы точного земледелия и методика построения карт посевных полей, содержащих данные статистики, был представлен в работе А. С. Рулева, С. С. Шинкаренко, В. Н. Бодровой, Н. В. Сидоровой, Н. В. Абрамова, Ю. И. Плескачева, А. И. Беленкова, А. Ю. Тюмакова [2, 3, 4].

Точное земледелие базируется на:

- сборе данных о сельскохозяйственном предприятии, посевных полях, возделываемых культурах, составе машинно-тракторного парка организации;
- анализе этой информации и выдаче сигналов управления;
- проведении агротехнологических решений.

Система принятия решений точного земледелия может основываться на применении имитационного моделирования, когда реальный процесс заменяется достаточно точной статической или динамической моделью.

Технологии точного земледелия находят практическое применение в уборочно-транспортных процессах, так как они оказывают большое влияние на конечную себестоимость зерна. Применение экономико-математических моделей при организации и последующем совершенствовании уборки сельскохозяйственных культур нашло отражение в работах Н. И. Стружкина, Е. В. Худяковой, К. В. Ключ-

¹ Близнякова Е. А. Исследование проблем функционирования грузового автомобильного транспорта при возделывании зерновых / Е. А. Близнякова // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 25–29 апреля 2022 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. Волгоград, 2022. С. 133–134.

² Близнякова Е. А. Исследование значимости построения вершин графа посевных полей для планирования работы автомобильного транспорта на микроуровне / Е. А. Близнякова, А. В. Куликов // VIII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орёл, 16–19 мая 2022 г.): сб. материалов конф. / редкол.: А. Н. Новиков (отв. ред.) [и др.]; ОГУ им. И. С. Тургенева. Орёл, 2022. С. 81–89.

³ Технологии, машины и оборудование для координатного (точного) земледелия: учебник для вузов / В. И. Балабанов [и др.]; под ред. В. И. Балабанова, В. Ф. Федоренко. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 240 с.

⁴ Оськин С. В., Тарасенко Б. Ф. Имитационное моделирование при формировании эффективных комплексов почвообрабатывающих агрегатов – еще один шаг к точному земледелию: монография / С. В. Оськин, Б. Ф. Тарасенко. Краснодар: Издательство ООО «КРОН», 2015. 510 с.

ковой, А. В. Орлянского⁵, Ю. Н. Блынского, В. В. Тихоновского, А. В. Сухосыра [5, 6, 7, 8, 9]. А. В. Кузнецовым, Г. В. Суриловой, С. И. Чемодановым было предложено рассчитывать технико-экономические показатели с помощью теории графов путем построения графа технологий уборки зерновых культур [10]. В этих работах граф рассматривался как иерархия выполнения уборочно-транспортных работ. В сложившейся ситуации специалистам транспортной логистики требуется уделить особую роль в совершенствовании организации работы автомобильного транспорта в новых условиях развития сельского хозяйства страны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения первой задачи были исследованы научные труды ученых Центра точного земледелия при Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева, посвященные методам точного земледелия в РФ. В работе используются методы статистического анализа данных поставок озимой пшеницы на экспорт в Иран с Волгоградской области. На микроуровне рассмотрено моделирование работы уборочных комплексов для агропредприятия Волгоградской области ООО «Прогресс» с учетом севооборота за период 2016–2020 гг. Методы системного анализа применялись для декомпозиции международной мультимодальной логистической системы перевозки экспортного зерна на три уровня с определением места и роли транспорта. Определены транспортные емкости графов на всех уровнях с получением результатов решения задачи линейного программирования: определение кратчайших расстояний между вершинами соответствующих графов и оптимальное закрепление «потребителей» за «поставщиками». Предложенные мероприятия по развитию исследований в области повышения работы автомобильного транспорта в международных мультимодальных логистических системах поставки зерна на экспорт возмож-

но реализовать с применением современных цифровых технологий на транспорте с внедрением беспилотных комбайнов и беспилотных автомобилей в уборочно-транспортном комплексе.

Микроуровень мультимодальной логистической системы представляет собой различные организации или объединения в сфере агропромышленного комплекса: сельскохозяйственные предприятия, товарищества, крестьянские (фермерские) хозяйства, индивидуальные предприниматели. Независимо от формы организации труда каждое предприятие должно обладать посевными полями, отведенными именно под сельскохозяйственные культуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В зависимости от выбранной схемы организации взаимодействия транспорта и комбайна время транспортного цикла автомобиля будет различным. В общем виде время транспортного цикла автотранспортного средства (АТС) будет складываться из времени погрузки автомобиля, движения с грузом, разгрузки и движения без груза⁶.

Важным этапом транспортного цикла является время погрузки автомобиля, на которое оказывает влияние организация взаимодействия автомобильного транспорта и комбайна.

С целью сокращения времени подъезда подвижного состава к комбайну необходимо произвести моделирование местоположения бункера комбайна в момент его заполнения. Введем систему координат и совместим ее с картой поля (рисунок 2).

Результаты моделирования карты работы трех и девяти комбайнов в уборочной бригаде показывают отсутствие смещения координат точек (бункеров) в декартовой системе поля первых комбайнов. Остальные бункера сдвигаются на ширину жатки (рисунок 3). Координаты точек также имеют кодировку в системе позиционирования ГЛОНАСС.

⁵ Общая имитационная модель технологического процесса уборки зерновых колосовых культур / П. А. Михайленко, А. В. Орлянский, А. И. Орлянская // Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы: сб. тр. Международной научно-практической конференции в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016» / Ставропольский ГАУ. Ставрополь, 2016. С. 222–226.

⁶ Эксплуатация машинно-тракторного парка: учебное пособие / А. И. Завражнов [и др.]; под ред. А. И. Завражнова; ФГБОУ ВО ТГТУ. Тамбов: ТГТУ, 2019. 224 с.

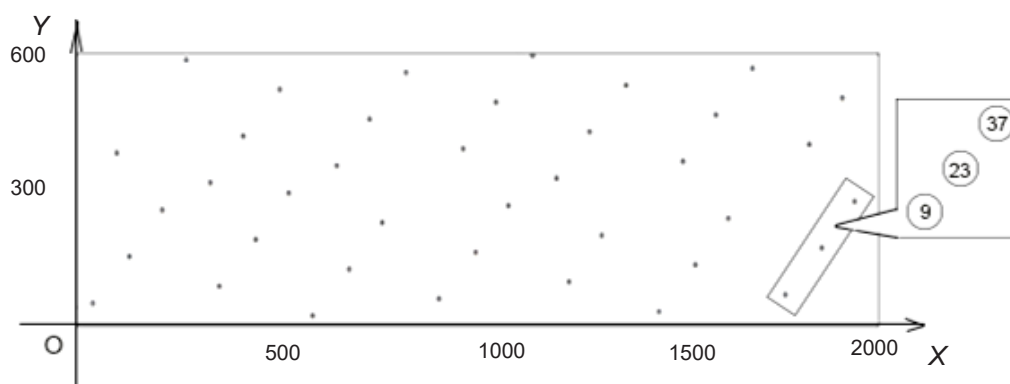


Рисунок 2 – Схема местоположения заполненных бункеров при работе в бригаде одного комбайна
(9, 23, 37 – номера заполненных бункеров с указанием их местоположения)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagram of the location of filled bunkers when working in a team of one combine harvester
(9, 23, 37 numbers of filled bunkers indicating their location)
Source: compiled by the authors.

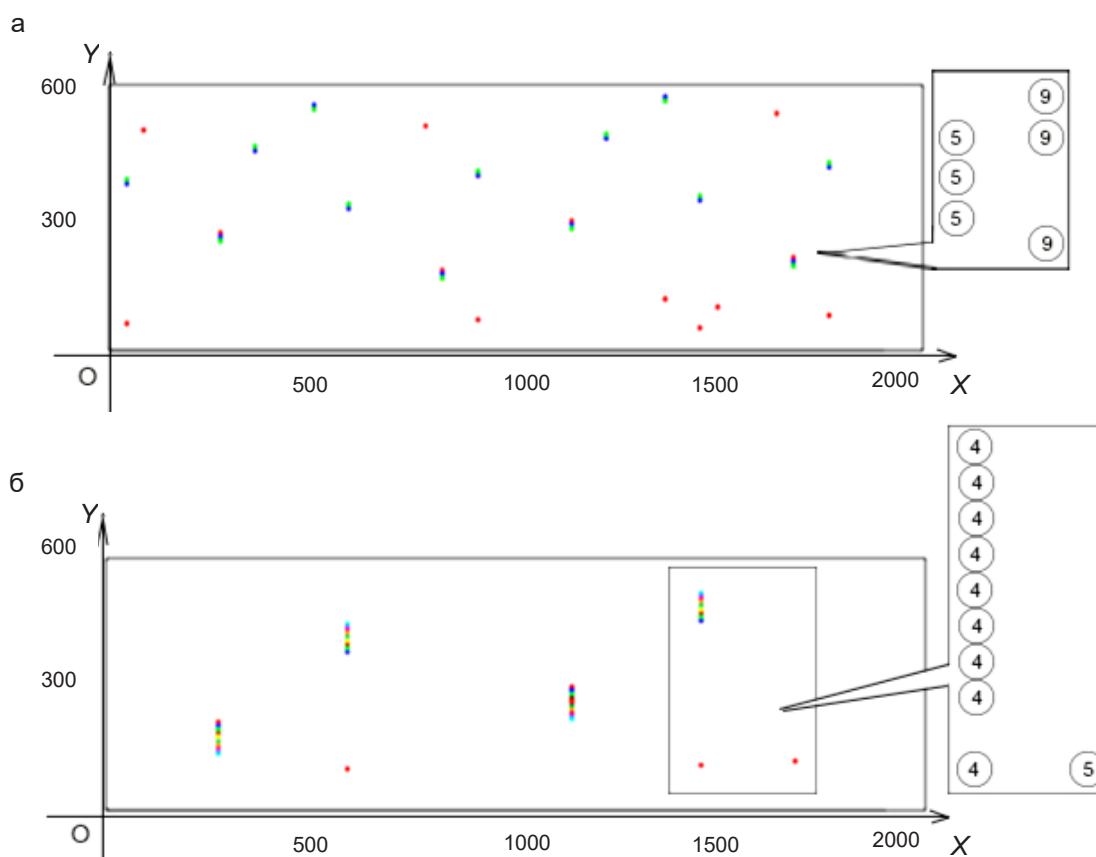


Рисунок 3 – Схемы местоположения заполненных бункеров при работе в бригаде:
а – трех комбайнов (на схеме цифры 5 и 9 указывают местоположение заполненных бункеров для трех комбайнов);
б – девяти комбайнов (на схеме цифры 4 и 5 указывают местоположение заполненных бункеров для девяти комбайнов)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagrams of the location of filled bunkers when working in a team:
a) three combines (in the diagram, the numbers 5 and 9 indicate the location of the filled bunkers for three combines);
b) nine combines (in the diagram, the numbers 4 and 5 indicate the location of the filled bunkers for nine combines)
Source: compiled by the authors.

Каждый заполненный бункер (N_i^6) имеет действительные значения в координатной плоскости xOy ($x_i; y_i$). Зная координаты точки (бункера) в пространстве, водитель будет подъезжать точно к моменту заполнения бункера комбайна зерном. В таблицах 1, 2, 3 приведены координаты бункеров в зависимости от числа комбайнов в бригаде при уборке

озимой пшеницы. Координаты бункеров, приведенные в таблицах 1, 2, 3, не составляет труда перевести в координаты позиционирования глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОННАС для дальнейшей работы беспилотного автомобильного транспорта и зерноуборочной техники.

Таблица 1
Координаты бункеров при работе в бригаде одного комбайна
Источник: составлено авторами.

Table 1
Coordinates of bunkers when working in a team of one combine
Source: compiled by the authors.

№	Порядковый номер бункеров комбайна																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Ox, м$	1137	274	589	1452	1685	822	41	904	1767	1370	507	356	1219	1918	1056	193	670	1533	1544	681
$Oy, м$	576	567	27	36	549	540	54	63	72	504	495	90	99	477	468	459	126	135	441	432
№	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$	$Ox, м$
$Oy, м$	182	955	1908	1229	366	497	1360	1777	914	51	812	1675	1462	599	264	1127	1990	1147	284	579
$Oy, м$	153	162	171	405	396	189	198	378	369	360	225	234	342	333	252	261	270	306	297	288

Таблица 2
Координаты бункеров при работе в бригаде трех комбайнов
Источник: составлено авторами.

Table 2
Coordinates of bunkers when working in a team of three combines
Source: compiled by the authors.

№	Первый комбайн		№	Второй комбайн		№	Третий комбайн	
	$Ox, м$	$Oy, м$		$Ox, м$	$Oy, м$		$Ox, м$	$Oy, м$
1	1137	288	1	1137	279	1	1137	270
2	274	261	2	274	252	2	274	243
3	589	45	3	589	315	3	589	324
4	1452	54	4	1452	333	4	1452	342
5	1685	207	5	1685	198	5	1685	189
6	822	180	6	822	171	6	822	162
7	41	63	7	41	369	7	41	378
8	904	72	8	904	387	8	904	396
9	1767	81	9	1767	405	9	1767	414
10	1370	117	10	1370	558	10	1370	589
11	1493	99	11	507	540	11	507	531
12	1644	522	12	356	441	12	356	450
13	781	495	13	1219	468	13	1219	477
14	85	486		–	–		–	–

Таблица 3
Координаты бункеров при работе в бригаде девяти комбайнов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Coordinates of bunkers when working in a team of nine combines
Source: compiled by the authors.

№	Первый комбайн		№	Второй комбайн		№	Третий комбайн	
	Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м
1	1137	288	1	1137	279	1	1137	270
2	274	207	2	274	198	2	274	189
3	589	99	3	589	369	3	589	378
4	1452	108	4	1452	441	4	1452	450
5	315	117	5	1685	459	5	—	—
№	Четвертый комбайн		№	Пятый комбайн		№	Шестой комбайн	
	Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м
1	1137	261	1	1137	252	1	1137	243
2	274	180	2	274	171	2	274	162
3	589	387	3	589	396	3	589	405
4	1452	459	4	1452	468	4	1452	477
5	—	—	5	—	—	5	—	—
№	Седьмой комбайн		№	Восьмой комбайн		№	Девятый комбайн	
	Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м		Ох, м	Оу, м
1	1137	234	1	1137	225	1	1137	216
2	274	153	2	274	144	2	274	135
3	589	414	3	589	423	3	589	432
4	1452	486	4	1452	495	4	1452	504
5	—	—	5	—	—	5	—	—

Зерно, собираемое с полей, отвозится автомобильным транспортом на зерновой ток для его послеуборочной обработки. На зерновом току зерно принимают с полей через автомобильные весы, взвешивают, очищают, сортируют, временно хранят, протравливают, сушат и размещают в складах длительного хранения.

В Чернышковском районе Волгоградской области находится три зерновых тока: в хут. Алешкин, пос. Красноярский и в хут. Нижнегнатов. Зная результаты расчетов для одной вершины⁷, произведем укрупненный расчет работы автомобильного транспорта с помощью метода теории графов^{8, 9} [11].

⁷ Близнякова Е. А. Исследование влияния количества комбайнов на задание режима функционирования автомобилей при обслуживании графа посевных полей / Е. А. Близнякова // Молодёжь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России = Youth and scientific-and-technical progress in road field of south of Russia: матер. XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (г. Волгоград, 25–27 мая 2022 г.) / ВолгГТУ. Волгоград, 2022. С. 247–251.

⁸ Близнякова Е. А. Использование современных методов определения кратчайших расстояний в мультимодальных логистических поставках удобрений из России / Е. А. Близнякова, С. А. Бондаренко // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. Волгоград, 2021. С. 74–75.

⁹ Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022616507 от 12 апреля 2022 г. Российская Федерация. Составление графа транспортной сети объектов города / А. В. Куликов, Р. В. Егоров, В. В. Шорин; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. 2022.

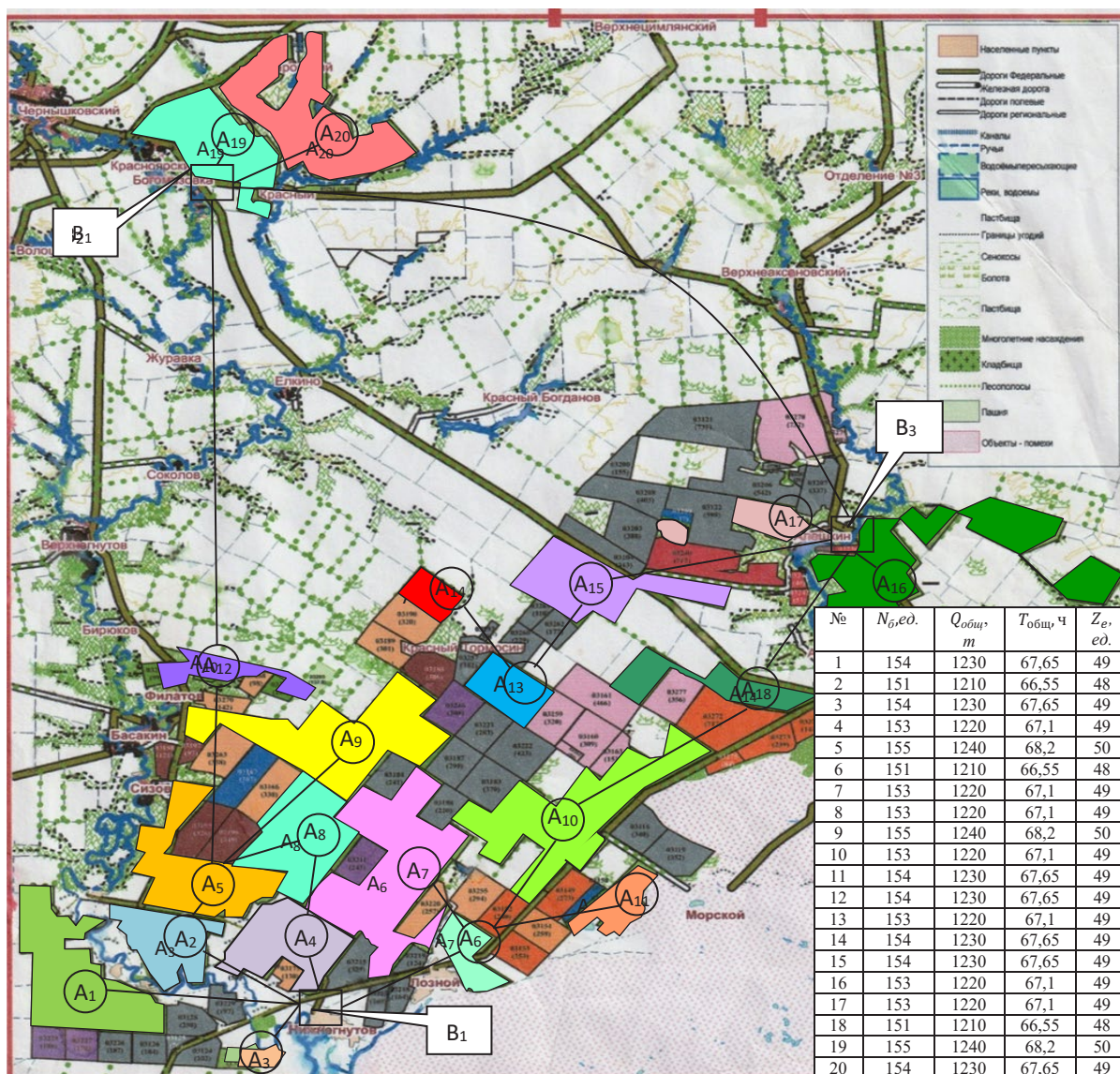


Рисунок 4 – Сформированный граф «Посевные поля озимой пшеницы – районные токи» с характеристикой уборочно-транспортного процесса конкретного хозяйства Чернышковского района
 Источник: составлено на основании карт посевных полей Чернышковского района Волгоградской области.

Figure 4 – 'Winter wheat sowing fields – regional barn-floors' formed graph with the characteristics of the harvesting and transport process of a particular farm of the Chernyshkovsky district
 Source: compiled on the basis of maps of sown fields of the Chernyshkovsky district of the Volgograd region.

Транспортную емкость графа посевных полей одной вершины рассчитаем, предполагая, что в исходной вершине A_i имеется N однотипных полей, засеянных озимой пшеницей. Тогда параметрами вершины A_i можно назвать число бункеров N_6 , намолачиваемых в вершине A_i , общий объем собранного зерна $Q_{\text{общ}}$, суммарное время наполнения бункеров

$T_{\text{общ}}$, суммарное количество ездов автомобиля Z_c . Транспортная емкость графа «Посевные поля – районные токи» Чернышковского района представлена на рисунке 4, где для каждой вершины графа приведены соответствующие характеристики уборочно-транспортного процесса.

Оптимальное распределение объемов собираемого зерна можно осуществить с помощью методов линейного программирования¹⁰. При решении задач, связанных с закреплением потребителей за поставщиками, целесообразно прибегнуть к классической транспортной задаче. Ее решение сводится к выбору транспортных маршрутов, по которым продукция различных предприятий перевозится на несколько конечных пунктов назначения.

С двадцати вершин графа посевных полей ООО «Прогресс» $A_1, \dots, A_{20}$ необходимо перевезти озимую пшеницу на три зерновых тока $B_1, \dots, B_3$. Необходимо так закрепить вершины графа посевных полей за зерновыми токами, чтобы общая транспортная работа была минимальной (показатель критерия оптимальности – расстояние). Математическую модель транспортной задачи в общем виде можно представить как⁹:

целевая функция:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{ПП} \sum_{j=1}^{ЗТ} a_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где x_{ij} – объем озимой пшеницы, перевозимой с i -го поля до j -го тока, км;

a_{ij} – расстояние от i -го поля до j -го тока, км, ограничения задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} + x_{12} + x_{13} = 1230, \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = 1210, \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} = 1230, \\ \dots \\ x_{201} + x_{202} + x_{203} = 1230, \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} + \dots + x_{201} = 16000, \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + \dots + x_{202} = 8000, \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} + \dots + x_{203} = 6000, \\ x_{ij} \geq 0, A_i \geq 0, B_j \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, ПП, j = 1, 2, \dots, ЗТ, \end{array} \right. \quad (2)$$

где A_i – объем зерна с i -го поля, т;

B_j – вместимость j -го зернового тока, т;

ПП – количество посевных полей, ед.;

ЗТ – количество зерновых токов, ед.

Для того, чтобы найти решение транспортной задачи, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{i=1}^{ПП} A_i = \sum_{j=1}^{ЗТ} B_j. \quad (3)$$

Проверим

$$\sum_{i=1}^{20} A_i = 24\,500 \neq \sum_{j=1}^3 B_j = 30\,000.$$

Так как вместимость складов зерновых токов учитывает площадь, используемую под резерв, и площадки для хранения зерна на открытом воздухе, будем считать, что суммарный запас (объем сбора) озимой пшеницы с посевных полей равен суммарным потребностям (вместимости складов) зерновых токов, т.е.

$$\sum_{i=1}^{20} A_i = \sum_{j=1}^3 B_j = 24\,500.$$

Решение транспортной задачи можно выполнить вручную или с помощью надстройки «Поиск решений» программы Microsoft Excel. Решение задачи вручную выполняется в два этапа:

первый этап – составляется базисный план с помощью метода аппроксимации У. Фогеля;

второй этап – полученный план перевозок оптимизируется методом потенциалов (таблица 4).

Из таблицы видно, что наиболее оптимальным является вариант перевозки зерна с посевных полей ООО «Прогресс» на ближайшие зерновые тока. Минимальная транспортная работа при такой схеме организации перевозок будет равна:

$$\begin{aligned} Z(x) = & 1230 \cdot 5 + 1210 \cdot 2 + 1230 \cdot 2 + 1220 \cdot 2 + \\ & + 1240 \cdot 10 + 1210 \cdot 4 + 1220 \cdot 3 + 1220 \cdot 4 + 1240 \cdot 7 + \\ & + 1220 \cdot 10 + 1230 \cdot 12 + 1230 \cdot 16 + 1220 \cdot 19 + \\ & + 1230 \cdot 21 + 1230 \cdot 8 + 1220 \cdot 4 + 1220 \cdot 4 + 1210 \cdot 7 + \\ & + 1240 \cdot 3 + 1230 \cdot 8 = 185\,210 \text{ т} \times \text{км}. \end{aligned}$$

Транспортировку зерна с поля на зерновой ток в агропредприятии ООО «Прогресс» производят автомобилями марки КамАЗ с прицепами общей грузоподъемностью 25 т. Формируя товарные партии зерна для дальнейшей ее реализации, нельзя смешивать зерно, поступившее на ток до и после дождя, с полей прямого и раздельного комбайнирования. Сформированное в партии по качеству зерно отгружается на элеватор в дневное время суток с указанием в документах красным цветом «сильная» или «ценная» в зависимости от класса пшеницы.

¹⁰ Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Куликов. 3-е изд., испр. Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. 560 с.

Таблица 4
Оптимальное закрепление посевных полей за районными токами,
определенное методом потенциалов
Источник: составлено авторами.

Table 4
Optimal fixation of sown fields for regional barn-floors determined by the method of potentials
Source: compiled by the authors.

Грузообразующие пункты (вершины графа – посевные поля)	Грузопоглощающие пункты (вершины графа – зерновые тока)						Итого	U_i
	B_1		B_2		B_3			
	Расстояние							
A_1	1230	5	+	41	+	33	1230	0
A_2	1210	2	+	36	+	31	1210	-3
A_3	1230	2	+	41	+	32	1230	-3
A_4	1220	2	+	35	+	27	1220	-3
A_5	1240	10	+	33	+	29	1240	5
A_6	1210	4	+	39	+	24	1210	-1
A_7	1220	3	+	31	+	22	1220	-2
A_8	1220	4	+	29	+	27	1220	-1
A_9	1240	7	+	27	+	24	1240	2
A_{10}	1220	10	+	34	+	15	1220	5
A_{11}	1230	12	+	38	+	18	1230	7
A_{12}	1230	16	+	22	+	26	1230	11
A_{13}	+	16	+	24	1220	19	1220	9
A_{14}	+	21	1230	21	+	20	1230	10
A_{15}	+	23	+	28	1230	8	1230	-2
A_{16}	+	35	+	38	1220	4	1220	-6
A_{17}	+	28	+	30	1220	4	1220	-6
A_{18}	+	23	+	35	1210	7	1210	-3
A_{19}	+	40	1240	3	+	30	1240	-8
A_{20}	+	43	1230	8	+	27	1230	-3
Итого	14700		3700		6100		24500	
V_j	5		11		10			

Зерновые тока представляют объединения, которые оснащаются всем необходимым оборудованием, и могут принимать зерно от нескольких агропредприятий. Так как в каждом районе Волгоградской области имеется более одного зернового тока, то для выхода на мезоуровень предположим, что тока агропромышленного предприятия становятся вершинами нового графа «Районные тока – районные элеваторы» внутри сельскохозяйственных районов области. Граф «Районные тока – районные элеваторы», сформированный для каж-

дого района, представляет собой мезоуровень (рисунок 5).

Для перевозки зерна агропромышленного предприятия ООО «Прогресс» с зерновых токов на районные элеваторы применяют автомобили большей грузоподъемности с использованием полуприцепов и прицепов. Этот факт является особенностью перевозок на мезоуровне, так как на микроуровне не всегда существует возможность использовать автомобиль с прицепом или полуприцепом.

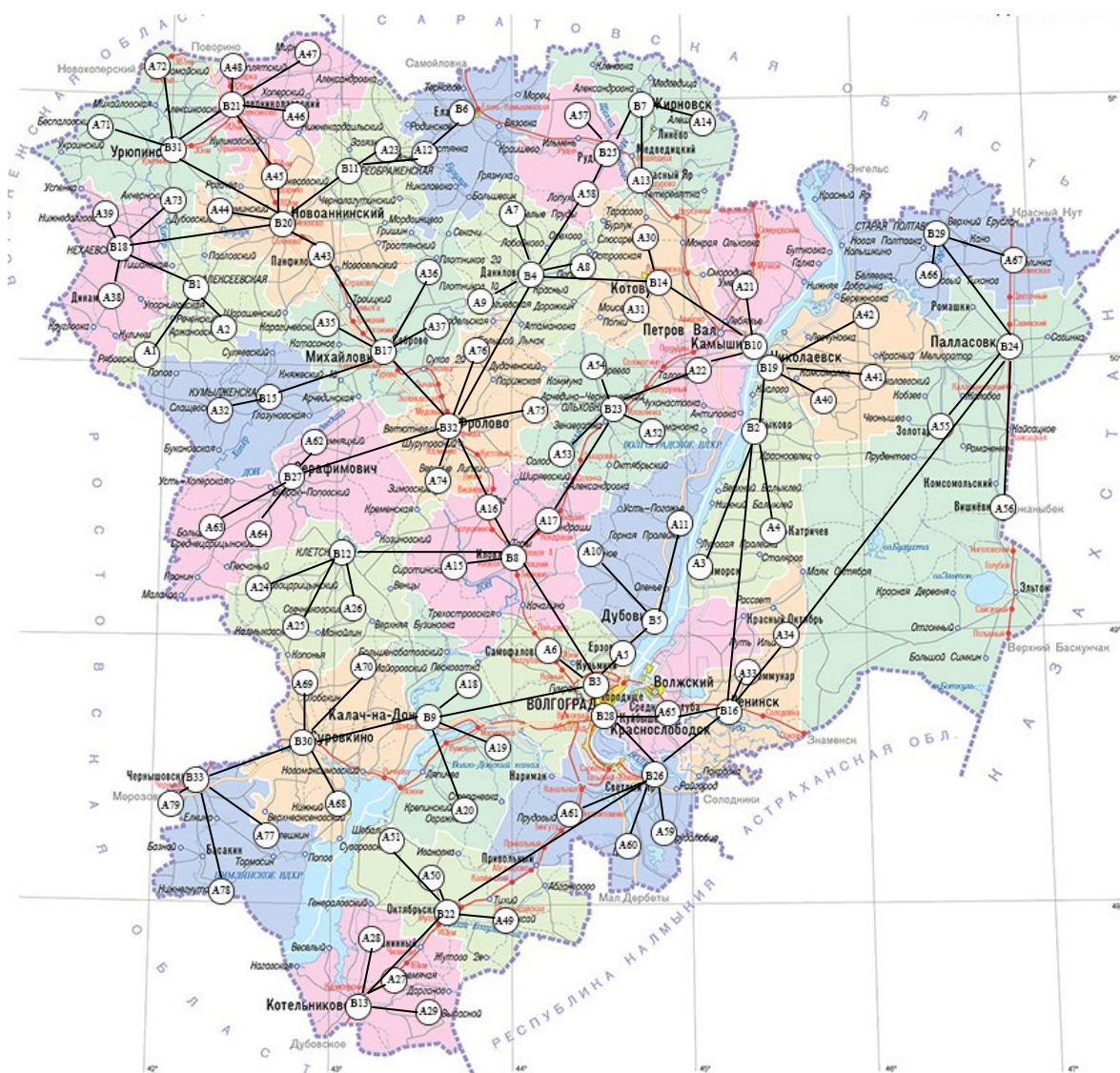


Рисунок 5 – Граф «Районные тока – районные элеваторы», сформированный для каждого района Волгоградской области

Источник: составлено на основании карты Волгоградской области: <https://www.sharada.ru/katalog/maps/regions/volgogradskaja-oblast>.

Figure 5 – 'Regional bar-floors – regional grain storages' graph formed for each district of the Volgograd region
Source: compiled on the basis of a map of the Volgograd region: <https://www.sharada.ru/katalog/maps/regions/volgogradskaja-oblast>.

Во-первых, это связано с тем, что грунтовые дороги не позволяют выдерживать осевые нагрузки, а во-вторых, поперечный и продольный профили меж полевых дорог не дают возможность осуществлять перевозку зерна тягачами с полуприцепами. На количество используемых автомобилей и их производительность будут оказывать влияние ритмичная погрузка на зерновых токах, сельскохозяйственные дороги с твердым покрытием, по которым уже разрешено движение автомобилей большой грузоподъемности в осенний период. Кроме того, существует возможность поточной разгрузки автомобилей на элеваторе, перевозящих зерно на экспорт согласно правилам функцио-

нирования мультимодальных логистических систем. Для этого прорабатывается информационный поток, что обеспечивает приоритетное обслуживание автомобилей в пункте приема элеватора.

В таблице 5 представлены наименования элеваторов районов области и их характеристики. Районные элеваторы размещают на пересечении водных и железнодорожных путей или на крупных железнодорожных станциях. Среди всех элеваторов муниципальных районов Волгоградской области наибольшей емкостью складов характеризуются элеваторы Иловлинского, Клетского, Новоаннинского, Урюпинского и Чернышковского районов.

Таблица 5

Характеристики районных элеваторов

Источник: составлено на основании данных сайта: <https://searchfactory.ru/spisok/elevatory-volgogradskaya-oblast>.

Table 5

Characteristics of regional grain storages

Source: compiled on the basis of website data: <https://searchfactory.ru/spisok/elevatory-volgogradskaya-oblast>.

Шифр вершины	Наименование муниципального района	Наименование элеватора	Общая мощность по хранению, тыс. т	Наименование железнодорожной станции
B1	Алексеевский	АО «Элеватор»	80	Аржановская
B2	Быковский	ОАО «Быковское ХПП»	40	Быково
B3	Городищенский	АО «Городищенский КХП»	15	Карповская
B4	Даниловский	ЗАО «Даниловское ХПП»	10	Данилов
B5	Дубовский	ЗАО «Дубовское ХПП»	25	Дубовское
B6	Еланский	ОАО «Еланский элеватор»	70	Елань-Камышинская
B7	Жирновский	ООО «Ададуrowsкий элеватор»	45	Ададуrowо
B8	Иловлинский	ОАО «Бердиевский элеватор»	100	Качалино
B9	Калачевский	ОАО «Калачевское ХПП»	60	Донская
B10	Камышинский	ОАО «Камышинский элеватор»	20	Петров Вал
B11	Киквидзенский	ООО «Киквидзенская сельхозхимия»	10	Преображенская
B12	Клетский	ОАО «Клетское ХПП»	200	Клетская
B13	Котельниковский	ОАО «Котельниковский элеватор»	50	Котельниково
B14	Котовский	ОАО «Лапшинский элеватор»	25	Лапшинская
B15	Кумылженский	АО «Кумылженское ХПП»	10	Кумылга
B16	Ленинский	ООО «КХП «Заволжье»	5	Ленинск
B17	Михайловский	ОАО «Себряковский элеватор»	75	Себряково
B18	Нехаевский	ООО «Становское»	80	Нехаевская
B19	Николаевский	АО «Николаевское ХПП»	5	Николаевская
B20	Новоаннинский	АО «Панфиловский элеватор»	100	Филоново
B21	Новониколаевский	ООО «Новониколаевский элеватор»	35	Алексиково
B22	Октябрьский	ООО «Октябрьский элеватор»	50	Жутово
B23	Ольховский	ОАО «Зензеватский элеватор»	10	Зензеватка
B24	Палласовский	ОАО «Палласовский элеватор»	5	Палласовка
B25	Руднянский	ООО «Руднянское ХПП»	30	Ильмень
B26	Светлоярский	ОАО «Червленое»	25	Абганерово
B27	Серафимовичский	АО «Серафимовичское ХПП»	90	Усть-Хоперская
B28	Среднеахтубинский	ООО «Волгоградский элеватор»	100	Ельшанка
B29	Старополтавский	ООО «Старополтавский элеватор»	5	Гмелинская
B30	Суровикинский	ОАО «Суровикинский элеватор»	65	Суровикино
B31	Урюпинский	ОАО «Урюпинский элеватор»	110	Урюпино
B32	Фроловский	ООО «Фроловский элеватор»	70	Арчеда
B33	Чернышковский	ОАО «Чернышковский элеватор»	100	Чернышков

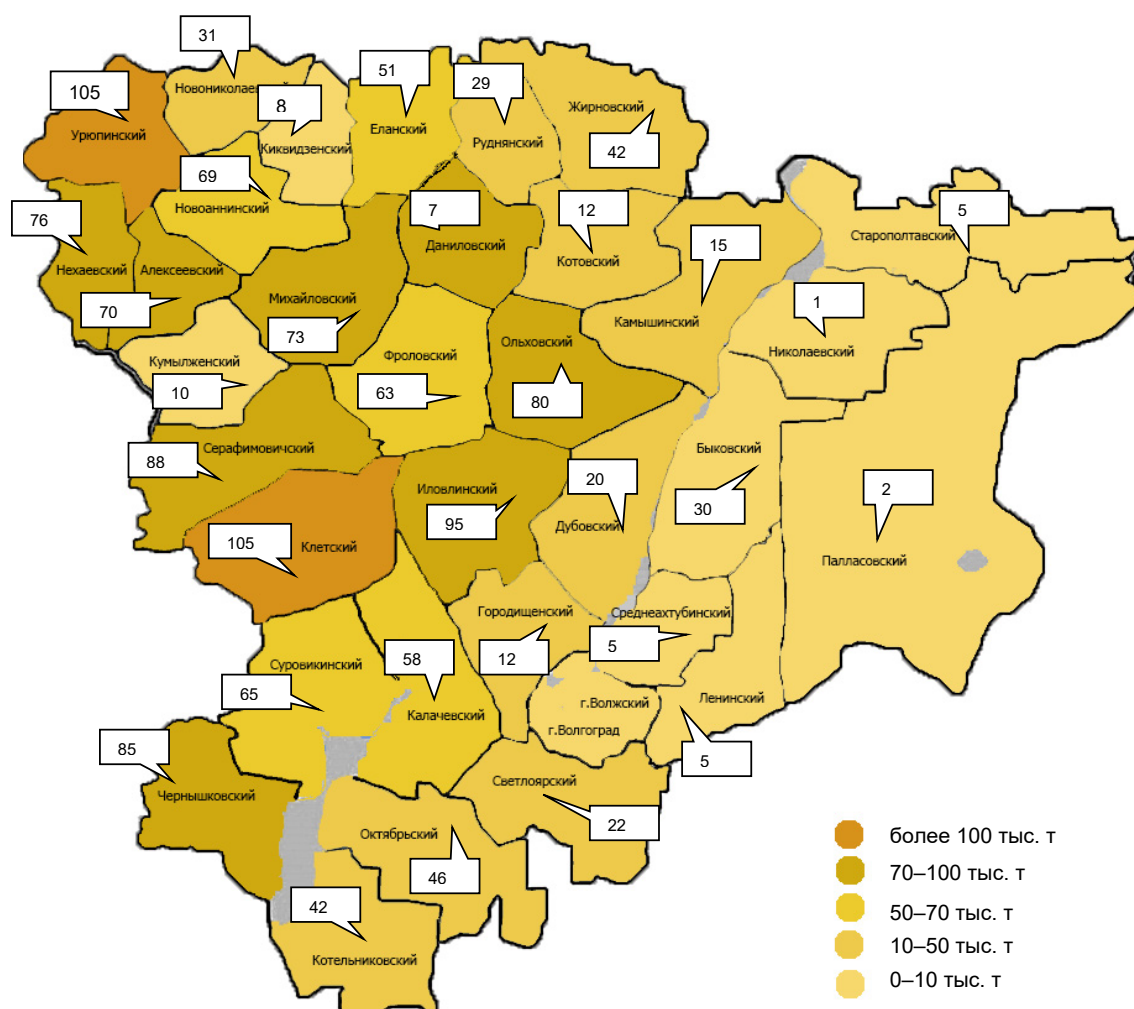


Рисунок 6 – Валовый сбор озимой пшеницы в Волгоградской области в 2021 г., тыс. т
 Источник: составлено на основании Росстата и данных сайта: https://znano.ru/media/posobie_po_volgogradskoj_oblasti_dlya_1_4_klassov-92133.

Figure 6 – Gross harvest of winter wheat in the Volgograd region in 2021, thousand tons
 Source: compiled on the basis of Rosstat and website data: https://znano.ru/media/posobie_po_volgogradskoj_oblasti_dlya_1_4_klassov-92133.

Развивая тему построения эффективных логистических транспортных систем с помощью теории графов, произведем поиск оптимального варианта закрепления районных токов за районными элеваторами при критерии оптимальности – расстояние. На рисунке 6 приведен запас (валовый сбор) озимой пшеницы каждого муниципального района Волгоградской области в 2021 г., который характеризует объемы перевозок зерновых.

Математическая модель транспортной задачи имеет вид:

целевая функция:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{PT} \sum_{j=1}^{P3} a_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где x_{ij} – объем озимой пшеницы, перевозимой с i -го тока до j -го элеватора, км;

a_{ij} – расстояние от i -го тока до j -го элеватора, км,

Таблица 6
Оптимальное закрепление районных токов за районными элеваторами,
определенное методом потенциалов
Источник: составлено авторами.

Table 6
Optimal fixing of district currents to regional grain storages determined by the method of potentials
Source: compiled by the authors.

Грузообразующий пункт (вершина графа - районный ток)	Грузопоглощающий пункт (вершина графа - районный элеватор)										Итого														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B28		B29	B30	B31	B32	B33									
A1	35	15	143	-	325	396	348	100	310	289	316	-	281	315	70	244	417	91	35						
A2	35	17	372	-	277	378	208	292	124	267	177	-	283	288	246	73	505	385	35						
A3	-	411	10	15	-	330	431	508	474	544	480	260	-	249	367	235	179	238	66	10					
A4	-	359	20	14	-	355	228	544	241	430	476	535	-	225	430	262	488	373	374	20					
A5	-	248	-	102	5	12	507	501	413	318	357	374	-	59	254	179	518	460	414	5					
A6	-	239	-	292	7	18	226	381	415	428	271	505	-	373	252	194	504	140	300	7					
A7	-	146	-	233	-	138	3	16	278	527	403	288	223	-	464	307	500	90	271	335	3				
A8	-	154	-	363	-	117	2	14	270	352	491	414	536	-	435	247	259	64	259	547	2				
A9	-	138	-	123	-	167	2	13	521	527	227	251	290	-	409	73	503	132	168	255	2				
A10	-	265	-	245	-	143	-	141	10	12	366	236	423	541	-	286	117	412	399	339	389	10			
A11	-	195	-	380	-	289	10	10	377	396	337	393	-	169	281	500	370	93	217	-	10				
A12	-	369	-	267	-	227	-	301	421	51	24	311	539	360	-	73	359	443	326	519	202	51			
A13	-	394	-	277	-	199	-	547	403	292	22	22	507	389	-	471	199	240	535	94	-	22			
A14	-	453	-	261	-	356	-	435	164	547	20	19	393	235	-	500	441	114	399	546	234	20			
A15	-	355	-	453	-	310	-	304	183	504	237	30	32	240	-	142	147	90	192	119	285	30			
A16	-	408	-	140	-	207	-	131	502	239	538	25	17	505	-	235	310	539	377	172	252	25			
A17	-	104	-	351	-	123	-	147	349	451	540	40	19	523	-	186	80	318	132	474	135	40			
A18	-	132	-	474	-	114	-	535	270	201	289	-	489	18	10	-	270	292	245	488	154	323	18		
A19	-	361	-	149	-	176	-	133	299	177	481	-	119	20	19	-	147	99	263	97	130	93	20		
A20	-	147	-	195	-	435	-	468	416	236	369	-	244	20	21	-	172	401	196	510	327	123	20		
A65	-	144	-	486	-	499	-	473	482	454	436	-	194	556	-	5	10	138	-	84	503	302	425	5	
A66	-	570	-	557	-	326	-	119	452	422	285	-	243	224	-	-	172	2	6	245	514	299	375	2	
A67	-	407	-	264	-	508	-	232	307	100	274	-	332	254	-	-	137	3	14	419	89	229	312	3	
A68	-	462	-	399	-	451	-	508	155	366	322	-	302	269	-	-	446	136	25	35	552	355	426	25	
A69	-	516	-	127	-	136	-	308	210	431	372	-	525	179	-	-	516	501	20	23	484	328	293	20	
A70	-	281	-	552	-	594	-	445	246	176	139	-	129	168	-	-	458	153	20	28	205	162	447	20	
A71	-	517	-	120	-	411	-	281	416	372	373	-	154	287	-	-	478	149	35	248	12	50	550	35	
A72	-	474	-	435	-	304	-	140	179	399	168	-	592	162	-	-	377	559	40	334	16	78	115	40	
A73	-	239	-	260	-	87	-	146	551	348	375	-	219	107	-	-	227	402	30	269	19	313	255	30	
A74	-	515	-	109	-	563	-	286	341	103	118	-	319	555	-	-	418	432	20	267	164	20	5	117	20
A75	-	550	-	579	-	366	-	550	287	245	217	-	266	192	-	-	221	567	23	419	367	10	114	23	23
A76	-	121	-	576	-	161	-	441	535	200	364	-	102	364	-	-	367	455	20	449	416	4	270	20	
A77	-	566	-	428	-	570	-	495	91	589	594	-	578	261	-	-	63	275	410	252	249	37	30	37	
A78	-	523	-	299	-	315	-	237	324	208	537	-	293	385	-	-	179	282	438	257	267	24	8	24	
A79	-	542	-	314	-	289	-	359	463	137	300	-	521	286	-	-	213	326	188	437	575	24	4	24	
Итого	70	30	12	7	20	51	42	95	58								5	5	65	105	63	85	1268		

ограничения задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{133} = 35, \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{233} = 35, \\ x_{31} + x_{32} + \dots + x_{333} = 10, \\ \dots \\ x_{791} + x_{792} + \dots + x_{7933} = 24, \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} + \dots + x_{791} = 80, \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + \dots + x_{792} = 40, \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} + \dots + x_{793} = 15, \\ \dots \\ x_{133} + x_{233} + x_{333} + \dots + x_{7933} = 100, \\ x_{ij} \geq 0, A_i \geq 0, B_j \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, PT, j = 1, 2, \dots, PЭ, \end{array} \right. \quad (5)$$

где A_i – объем зерна с i -го районного тока, тыс. т;

B_j – вместимость j -го районного элеватора, тыс. т;

PT – количество районных токов, ед.;

PЭ – количество районных элеваторов, ед.

Сбалансирuem задачу:

$$\sum_{i=1}^{79} A_i = \sum_{j=1}^{33} B_j = 1385.$$

В общем виде решение транспортной задачи представлено в таблице 6.

Можно отметить, что зерно с токов транспортируется на элеваторы, расположенные в одном и том же районе, что и тока. Это объясняется наличием договорных обязательств между этими элементами агропромышленного комплекса по поставке, обработке и хранению зерновых сельскохозяйственных культур.

Минимальная транспортная работа при такой схеме организации перевозок будет равна

$$\begin{aligned} Z(x) = & 35 \cdot 15 + 35 \cdot 17 + 10 \cdot 15 + 20 \cdot 14 + 5 \cdot 12 + 7 \cdot 18 + \\ & + 3 \cdot 16 + 2 \cdot 14 + 2 \cdot 13 + 10 \cdot 12 + 10 \cdot 10 + 51 \cdot 24 + \\ & + 22 \cdot 22 + 20 \cdot 19 + 30 \cdot 32 + 25 \cdot 17 + 40 \cdot 19 + 18 \cdot 10 + \\ & + 20 \cdot 19 + 20 \cdot 21 + 7 \cdot 9 + 8 \cdot 15 + 8 \cdot 16 + 5 \cdot 4 + 7 \cdot 9 + \\ & + 6 \cdot 15 + 15 \cdot 16 + 14 \cdot 14 + 13 \cdot 10 + 6 \cdot 3 + 6 \cdot 18 + 10 \cdot 15 + \\ & + 3 \cdot 9 + 2 \cdot 7 + 32 \cdot 22 + 21 \cdot 31 + 20 \cdot 15 + 38 \cdot 14 + 38 \cdot 13 + \\ & + 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 8 + 0,4 \cdot 5 + 29 \cdot 17 + 21 \cdot 16 + 19 \cdot 16 + \\ & + 13 \cdot 13 + 9 \cdot 8 + 9 \cdot 7 + 15 \cdot 14 + 16 \cdot 16 + 15 \cdot 15 + 4 \cdot 6 + \\ & + 2 \cdot 9 + 2 \cdot 8 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 3 + 15 \cdot 23 + 14 \cdot 35 + 7 \cdot 15 + 7 \cdot 17 + \\ & + 8 \cdot 9 + 28 \cdot 20 + 32 \cdot 10 + 28 \cdot 15 + 5 \cdot 10 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 14 + \\ & + 25 \cdot 35 + 20 \cdot 23 + 20 \cdot 28 + 35 \cdot 12 + 40 \cdot 16 + 30 \cdot 19 + \\ & + 20 \cdot 5 + 23 \cdot 10 + 20 \cdot 4 + 37 \cdot 30 + 24 \cdot 8 + 24 \cdot 4 = \\ & = 21\,385 \text{ тыс. т} \times \text{км}. \end{aligned}$$

Подобный расчет находит применение не только при долговременном взаимодействии токов и элеваторов одного и того же района, но и в случае, когда оборудование элеваторов изнашивается и отказывает вследствие старения механизмов. В подобном случае происходит перенаправление объемов пшеницы на ближайшие элеваторы.

В условиях ограниченности торговых отношений России с другими странами, связанной с непрекращающимися с 2014 г. санкциями со стороны США и Европейского союза, вопрос обеспечения продовольственной безопасности страны выходит на первый план. Согласно Доктрине¹¹ обеспечение продовольственной безопасности является фактором сохранения государственности и суверенитета страны, важнейшей составляющей социально-экономической политики, а также повышения качества жизни российских граждан путем гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения [12]. Указ определяет уровень продовольственной независимости в процентах. Для зерна он составляет не менее 95%.

Макроуровень мультимодальной логистической системы отражает внешнеэкономические отношения России. Достаточная обеспеченность страны озимой пшеницей дает возможность экспортировать урожай за рубеж и конкурировать с другими государствами за первенство в агросфере.

При организации международной перевозки значительная часть зерна транспортируется автомобильным транспортом, что объясняется тем, что железнодорожные перевозки ограничены дорожной инфраструктурой, а также большими объемами перевозки зерна от мест сбора до районных элеваторов [13].

Российское зерно является высококачественным и пользуется большим спросом в ряде стран Ближнего Востока. Третье место по потреблению российского зерна занимает Иран. Иран и Россия являются членами политического соглашения Каспийской пятерки, куда входят еще Азербайджан, Казахстан и Туркменистан. Цель объединения – сохранение безопасности акватории Каспийского моря и улучшение торговых отношений между странами¹².

Волгоградская область имеет длительные отношения с Ираном, ежегодно поставляя в

¹¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20. Доступ из справ. -правовой системы «Консультант плюс».

¹² Конвенция о правовом статусе Каспийского моря: официальное интернет-представительство президента России. Режим доступа : <http://www.kremlin.ru/supplement/5328>.

страну большие объемы озимой пшеницы. Задача обеспечения экспорта в Иран состоит в организации эффективной работы автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе на макроуровне. Макроуровень этой логистической системы будет состоять из районных и портовых элеваторов. Портовые элеваторы располагаются на пересечении железнодорожных и водных путей и могут как отгружать зерно в морские суда на экспорт, так и принимать зерно, прибывшее по импорту, потребителям внутри страны.

В качестве грузополучателей на мезоуровне принимаются три портовых хлебоприемных пункта Волгоградской области: г. Дубовка, г. Волгоград, г. Волгодонск. В данные порты озимая пшеница может транспортироваться следующим образом:

- 1) в порт г. Волгограда и порт г. Волгодонска озимая пшеница доставляется со станций районных элеваторов автомобильным или железнодорожным транспортом;
- 2) в порт г. Дубовка только автомобильным транспортом.

Каждая из схем перевозки обладает своими особенностями:

1) порт г. Волгограда находится на территории города, поэтому целесообразнее перевозить зерно не автомобильным транспортом, а железнодорожным;

2) порт г. Волгодонска дает возможность выхода в Азово-Черноморский бассейн в другие страны, но нужно проходить Волго-Донской канал;

3) порт г. Дубовки имеет возможность загрузки судов река-море. На г. Дубовку можно ориентировать районы и агропромышленные комплексы, находящиеся вблизи и не имеющие железной дороги. При транспортировке через г. Дубовку судно проходит только один шлюз через Волжскую ГЭС.

Целиком загруженное судно река-море в любом из вышеперечисленных портов транспортирует зерно в порт Энзели города Бендер-Энзели Исламской Республики Иран [13]. На рисунке 7 представлен маршрут движения судна VOLGO-BALT 239, загруженного зерном.

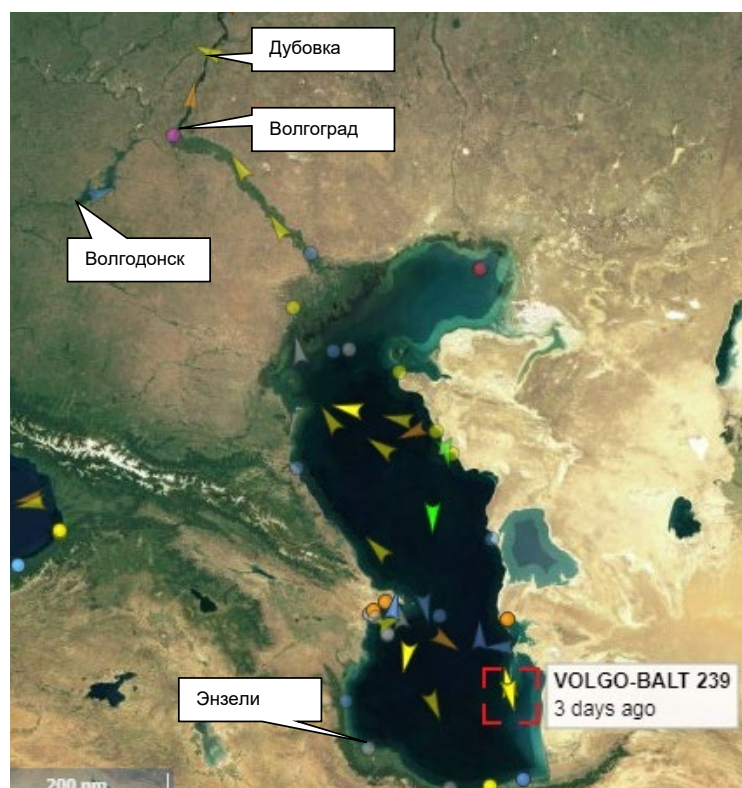


Рисунок 7 – Маршрут движения судна VOLGO-BALT 239

Источник: составлено на основании данных сайта:

<https://www.vesselfinder.com/ru/vessels/VOLGO-BALT-239-IMO-8230534-MMSI-273330900>.

Figure 7 – The route of VOLGO-BALT 239 vessel

Source: compiled on the basis of website data:

<https://www.vesselfinder.com/ru/vessels/VOLGO-BALT-239-IMO-8230534-MMSI-273330900>.



Рисунок 8 – Граф «Районные элеваторы – портовые элеваторы», сформированный для каждого района Волгоградской области
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Regional grain storages – port grain storages' graph formed for each district of the Volgograd region
Source: compiled by the authors.

Для планирования работы транспорта на макроуровне разработан граф «Районные элеваторы – портовые хлебоприемные пункты» для зарубежной отправки (рисунок 8).

Планирование работы транспорта осуществляется с помощью метода линейного программирования. Задача работы транспорта состоит в своевременной перевозке зерна с наименьшими логистическими затратами. Математическая модель транспортной задачи имеет вид:

целевая функция:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{P3} \sum_{j=1}^{П3} a_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где x_{ij} – объем озимой пшеницы, перевозимой с i -го элеватора до j -го порта, км;
 a_{ij} – расстояние от i -го элеватора до j -го порта, км,

ограничения задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} + x_{12} + x_{13} = 70, \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = 30, \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} = 12, \\ \dots \\ x_{331} + x_{332} + x_{333} = 85, \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} + \dots + x_{331} = 3000, \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + \dots + x_{332} = 1000, \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} + \dots + x_{333} = 800, \\ x_{ij} \geq 0, A_i \geq 0, B_j \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, \text{РЭ}, j = 1, 2, \dots, \text{ПЭ}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где A_i – объем зерна с i -го районного элеватора, т;

B_j – вместимость j -го портового элеватора, т;
РЭ – количество районных элеваторов, ед.;
ПЭ – количество портовых элеваторов, ед.;
Так как на портовых элеваторах обязательно есть резервные склады, то пусть сохраняется баланс

$$\sum_{i=1}^{33} A_i = \sum_{j=1}^3 B_j = 1358.$$

В таблице 7 приведено оптимальное закрепление районных элеваторов за портовыми элеваторами при перевозке озимой пшеницы из Волгоградской области в Иран в мультимодальной логистической системе.

Таблица 7
Оптимальное закрепление районных элеваторов за портовыми элеваторами, определенное методом потенциалов
Источник: составлено авторами.

Table 7
Optimal attachment of regional grain storages to port grain storages determined by the method of potentials
Source: compiled by the authors.

Грузообразующие пункты (вершины графа – районные элеваторы)	Грузопоглощающие пункты (вершины графа – портовые элеваторы)						Итого	U_i
	B_1		B_2		B_3			
	Расстояние							
A_1	70	320	0	520	0	360	70	0
A_2	30	130	+	440	+	170	30	-190
A_3	12	37	+	340	+	79	12	-283
A_4	+	240	+	470	7	240	7	-120
A_5	+	89	+	400	20	40	20	-320
A_6	51	310	+	520	+	350	51	-10
A_7	+	410	+	600	+	440	42	80
A_8	+	122	+	410	+	250	95	-110
A_9	+	90	+	290	+	130	58	-230
A_{10}	+	330	+	530	+	470	15	10
A_{11}	+	310	+	510	+	570	8	-10
A_{12}	+	210	108	200	+	260	108	-320
A_{13}	+	210	42	100	+	260	42	-420
A_{14}	+	220	+	540	12	170	12	-190

Грузообразующие пункты (вершины графа – районные элеваторы)	Грузопоглощающие пункты (вершины графа – портовые элеваторы)						Итого	U_i
	B_1		B_2		B_3			
	Расстояние							
A_{15}	10	260	+	460	+	300	10	-60
A_{16}	5	77	+	390	+	120	5	-243
A_{17}	73	190	+	400	+	240	73	-130
A_{18}	76	350	+	560	+	400	76	30
A_{19}	1	210	+	520	+	250	1	-110
A_{20}	+	250	+	460	69	240	69	-120
A_{21}	31	330	+	540	+	380	31	10
A_{22}	46	58	+	280	+	110	46	-262
A_{23}	+	200	+	510	8	140	8	-220
A_{24}	2	280	+	590	+	300	2	-60
A_{25}	+	350	+	550	29	320	29	-40
A_{26}	22	65	+	270	+	120	22	-255
A_{27}	88	260	+	460	+	300	88	-60
A_{28}	5	62	+	370	+	102	5	-258
A_{29}	+	370	+	680	5	260	5	-100
A_{30}	65	130	+	330	+	190	65	-190
A_{31}	105	350	+	550	+	400	105	30
A_{32}	63	160	+	450	+	210	63	-160
A_{32}	+	240	85	130	+	280	85	-390
Итого	931		235		192		1358	
V_j	320		520		360			

Минимальная транспортная работа при такой схеме организации перевозок будет равна

$$\begin{aligned}
 Z(x) = & 70 \cdot 320 + 30 \cdot 130 + 12 \cdot 37 + 7 \cdot 240 + 20 \cdot 40 + \\
 & + 51 \cdot 310 + 42 \cdot 250 + 95 \cdot 88 + 58 \cdot 72 + 15 \cdot 200 + \\
 & + 8 \cdot 310 + 108 \cdot 200 + 42 \cdot 100 + 12 \cdot 170 + 10 \cdot 260 + \\
 & + 5 \cdot 77 + 73 \cdot 190 + 76 \cdot 350 + 1 \cdot 210 + 69 \cdot 240 + \\
 & + 31 \cdot 330 + 46 \cdot 58 + 8 \cdot 140 + 2 \cdot 280 + 29 \cdot 320 + 22 \cdot 65 + \\
 & + 88 \cdot 260 + 5 \cdot 62 + 5 \cdot 260 + 65 \cdot 130 + 105 \cdot 350 + \\
 & + 63 \cdot 160 + 85 \cdot 130 = 277\,723 \text{ тыс. т} \times \text{км.}
 \end{aligned}$$

Выявлено, что международные мультимодальные логистические системы поставки экспортного зерна в Иран необходимо рассматривать с использованием системного подхода. Предлагается логистическую систему рассматривать на микро-, мезо- и макроуровнях [14, 15, 16]. На каждом из уровней необходимо планировать работу автомобильного транспорта, основанную на расчетах «транспортной емкости» графов «Посевные поля –

районные тока», «Районные тока – районные элеваторы», «Районные элеваторы – портовые элеваторы». Агропредприятие Волгоградской области ООО «Прогресс» получило возможность организовывать и планировать свою работу с учетом новых информационных технологий, обеспечивающих более высокую эффективность сельскохозяйственной деятельности при возделывании озимой пшеницы с частичной реализацией на экспорт в Иран.

Совершенствование организации функционирования автомобильного транспорта в международных мультимодальных логистических системах экспортных поставок зерна не может существовать без применения технологий точного земледелия в уборочно-транспортных процессах на микроуровне. Применение правильных логистических технологий на транспорте и в организации возделывания озимой пшеницы оказывает большое влияние на конечную себестоимость зерна. Исследование в этом направлении в настоящее время является актуальным и требует продолжения исследований с использованием цифровых технологий при внедрении беспилотных автомобилей^{13,14} и комбайнов в агропромышленных комплексах РФ¹⁵ [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование организации функционирования автомобильного транспорта в международной мультимодальной логистической системе экспортных поставок зерна не может существовать без применения технологий точного земледелия в уборочно-транспортных процессах. Предлагаемые методы моделирования графа посевных полей на микроуровне, ориентированные на расчетные координаты заполненных бункеров комбайнов. Полученные координаты легко перестраиваются в системе ГЛОНАСС в координатные метки, по которым существует возможность выполнять уборочно-транспортные процессы с использованием беспилотной техники. Разработанные

рекомендации по совершенствованию организации функционирования автомобильного транспорта будут применяться в ООО «АЛЬФА ТРЕЙД» при организации перевозок экспортного зерна в международных мультимодальных логистических системах.

Применение правильных логистических технологий на автомобильном транспорте и в организации возделывания озимой пшеницы оказывает большое влияние на конечную себестоимость зерна и на гарантированное обеспечение продовольственной безопасности РФ. Исследование в этом направлении в настоящее время является актуальным и перспективным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаренко А. В., Беленков А. Н. Центр точного земледелия РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева учебно-научный инновационный комплекс // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 9. С. 63–64.
2. Геоинформационные технологии в обеспечении точного земледелия / А. С. Рулев, С. С. Шинкаренко, В. Н. Бодрова, Н. В. Сидорова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4. С. 1–8.
3. Абрамов Н. В. Электронный образ полей в системе точного земледелия // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 5. С. 9–12.
4. Точное (координатное) земледелие: реальность и перспективы / Ю. Н. Плещачев, А. И. Беленков, А. Ю. Тюмаков, Сабо Умар // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 2. С. 1–6.
5. Стружкин Н. И. К проблеме эффективности уборки зерновых культур // Нива Поволжья. 2013. № 4. С. 53–60.
6. Худякова Е. В., Клочкова К. В. Оптимизация технико-экономических параметров организации процесса уборки зерновых культур на основе имитационного моделирования // Экономика и организация инженерно-технических систем в АПК. 2015. № 5. С. 60–64.

¹³ Рубежная Е. Д. Перспективы внедрения беспилотного транспорта в России / Е. Д. Рубежная, Н. А. Филиппова // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов IV Национальной научно-практической конференции / СибАДИ. Омск, 2021. С. 224–228.

¹⁴ Dorofeev, A. Methodology of freight transport management in the arctic zone of Russia with account for natural and climatic factors / A. Dorofeev, V. Kurganov, V. Vlasov, V. Bogumil, N. Fillipova, Y. Trofimenko // Transportation Research Procedia: collection of materials International Conference of Arctic Transport Accessibility: Networks and Systems / St. Petersburg State University of Civil Engineering and Architecture. St. Petersburg, 2021. С. 735-739.

¹⁵ Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2019661876 от 10 сентября 2019 г. Российская Федерация. Программа расчета маршрута доставки грузов в мультимодальной транспортно-технологической системе / Н. А. Филиппова; ФГБОУ ВО МАДИ. 2019.

7. Орлянский А. В. Основные принципы построения имитационной модели уборочно-транспортной системы заготовки кормов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2017. № 7. С. 35–36.

8. Орлянский А. В., Михайленко П. А., Орлянская А. В. Имитационное моделирование уборочно-процесса с применением бункера-перегрузчика зерна // Агроснабформ. 2017. № 5. С. 73–75.

9. Блынский Ю. Н., Тихоновский В. В., Сухосыр А. В. Применение систем спутниковой навигации в построении уборочно-транспортного процесса на уборке зерновых в Сибири // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2009. № 1. С. 52–56.

10. Кузнецова А. В., Сурилова Г. В., Чемоданов С. И. Методика проектирования технологий уборки зерновых культур в условиях Сибири // Техника и оборудование для села. 2009. № 8. С. 4–16.

11. Близнякова Е. А., Куликов А. А., Куликов А. В. Сравнительный анализ методов поиска кратчайшего пути в графе // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 1. С. 80–87. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.

12. Фирсова С. Ю., Куликов А. В., Советбеков Б. Роль транспортной логистики в обеспечении экзистенциальной безопасности человека // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета (Бишкек). 2019. Т. 19, № 8. С. 97–101.

13. Куликов А. В., Фирсова С. Ю., Советбеков Б. Совершенствование организации перевозок экспортных зерновых культур // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета (Бишкек). 2019. Т. 19, № 4. С. 46–52.

14. Филиппова Н. А., Каримова П. А. Иерархические уровни управления мультимодальной транспортной системой для перевозки грузов северного завоза // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2019. Т. 59, № 4. С. 99–102.

15. Dorofeev A., Altukhova N., Fillipova N., Pashkova T., Ponomarev M. Development of transportation management system with the use of ontological and architectural approaches to ensure trucking reliability // Sustainability. 2020. Т. 12. № 20. С. 1–16.

16. Филиппова Н. А., Каримова П. А. Организация работы взаимодействующих видов транспорта по единым технологическим процессам // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 2. С. 42–45.

17. Филиппова Н. А., Власов В. М. Методология повышения эффективности и надежности транспортно-технологической мультимодальной системы севера России // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22, № 6. С. 55–65.

REFERENCES

1. Zaharenko A. V., Belenkov A. N. Centr tochnogo zemledelija RGAU-MSHA imeni K.A. Timirjazeva uchebno-nauchnyj innovacionnyj kompleks [Precision Agriculture Center of the Russian State Agricultural

Academy named after K.A. Timiryazev educational and scientific innovation complex]. *Dostizhenija nauki i tehniki APK*. 2008; 9: 63–64. (in Russ.)

2. Rulev A. S., Shinkarenko S. S., Bodrova V. N., Sidorova N. V. Geoinformacionnye tehnologii v obespechenii tochnogo zemledelija [Geoinformation technologies in ensuring precision agriculture]. *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2018; 4:1–8. (in Russ.)

3. Abramov N. V. Jelektronnyj obraz polej v sisteme tochnogo zemledelija [Electronic image of fields in the precision farming system]. *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021; 5: 9–12. (in Russ.)

4. Pleskachev Ju. N., Belenkov A. I., Tjumakov A. Ju., Sabo Umar Tochnoe (koordinatnoe) zemledelie: real'nost' i perspektivy [Precise (coordinate) agriculture: reality and prospects]. *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2016; 2: 1–6. (in Russ.)

5. Struzhkin N. I. K probleme jeffektivnosti uborki zernovyh kul'tur [To the problem of the efficiency of harvesting grain crops]. *Niva Povolzh'ja*. 2013; 4: 53–60. (in Russ.)

6. Hudjakova E. V., Klochkova K. V. Optimizacija tehniko-jekonomicheskikh parametrov organizacii processa uborki zernovyh kul'tur na osnove imitacionnogo modelirovanija [Optimization of technical and economic parameters of the organization of the process of harvesting grain crops based on simulation modeling]. *Jekonomika i organizacija inzhenerno-tehnicheskikh sistem v APK*. 2015; 5: 60–64. (in Russ.)

7. Orlyanskij A. V. Osnovnye principy postroenija imitacionnoj modeli uborochno-transportnoj sistemy zagotovki kormov [The basic principles of constructing a simulation model of the harvesting and transport system of forage harvesting]. *Mehanzizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2017; 7:35–36. (in Russ.)

8. Orlyanskij A. V., Mihajlenko P. A., Orlyanskaja A. I. Imitacionnoe modelirovanie uborochnogo processa s primeneniem bunkera-peregruzchika zerna [Simulation modeling of the harvesting process using a grain reloading hopper]. *Agrosnabforum*. 2017; 5: 73–75. (in Russ.)

9. Blynskiy Ju. N., Tihonovskij V. V., Suhosyr A. V. Primenenie sistem sputnikovoj navigacii v postroenii uborochno-transportnogo processa na uborke zernovyh v Sibiri [The use of satellite navigation systems in the construction of the harvesting and transport process for harvesting grain in Siberia]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2009; 1: 52–56. (in Russ.)

10. Kuznecova A. V., Surilova G. V., Chemodanov S. I. Metodika proektirovanija tehnologij uborki zernovyh kul'tur v uslovijah Sibiri [Methodology of designing technologies for harvesting grain crops in Siberia]. *Tehnika i oborudovanie dlja sela*. 2009; 8: 4–16. (in Russ.)

11. Bliznjakova E. A., Kulikov A. A., Kulikov A. V. Sravnitel'nyj analiz metodov poiska kratchajshogo puti

v grafe [Comparative analysis of methods for finding the shortest path in a graph]. *Arhitektura, stroitel'stvo, transport*. 2022; 1: 80-87. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87. (in Russ.)

12. Firsova S. Ju., Kulikov A. V., Sovetbekov B. Rol' transportnoj logistiki v obespechenii jekzistencional'noj bezopasnosti cheloveka [The role of transport logistics in ensuring existential human security]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavjanskogo universiteta (Bishkek)*. 2019; T. 19, № 8: 97-101. (in Russ.)

13. Kulikov A. V., Firsova S. Ju., Sovetbekov B. Sovershenstvovanie organizacii perevozok jeksportnyh zernovyh kul'tur [Improving the organization of transportation of export grain crops / A.V. Kulikov, S. Y. Firsova, B. Sovetbekov]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavjanskogo universiteta (Bishkek)*. 2019; T.19, № 4: 46-52. (in Russ.)

14. Fillipova N. A., Karimova P. A. Ierarhicheskie urovni upravlenija mul'timodal'noj transportnoj sistemoj dlja perevozki грузов северного завоза [Hierarchical levels of management of a multimodal transport system for the transportation of goods of northern import]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2019; T.59, № 4: 99-102. (in Russ.)

15. Dorofeev A., Altukhova N., Fillipova N., Pashkova T., Ponomarev M. Development of transportation management system with the use of ontological and architectural approaches to ensure trucking reliability // *Sustainability*. 2020. T.12. No. 20. pp. 1-16.

16. Fillipova N. A., Karimova P. A. Organizacija raboty vzaimodejstvujushih vidov transporta po edinyim tehnologičeskim processam [Organization of the work of interacting modes of transport according to unified technological processes]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija*. 2019; 2: 42-45. (in Russ.)

17. Fillipova N. A., Vlasov V. M. Metodologija povyšeniya jeffektivnosti i nadezhnosti transportno-tehnologičeskoj mul'timodal'noj sistemy severa Rossii []. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii*. 2019; T. 22, № 6: 55-65. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Куликов А. В. Постановка цели и задач исследования, разработка методики расчета мультимодальной логистической системы перевозки зерна на экспорт с помощью теории графов.

Близнякова Е. А. Ознакомление и анализ отечественного и зарубежного опыта. Проведение расчетов, анализ полученных результатов.

Павлов П. А. Сбор и анализ показателей функционирования автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе перевозки зерна.

Куликов А. А. Поиск и анализ литературных источников согласно выдвинутым задачам исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Alexey V. Kuliko. Setting the goals and objectives of the study, developing a methodology for calculating a multimodal logistics system for grain transportation for export using graph theory.

Elena A. Bliznyakova. Familiarization and analysis of domestic and foreign experience. Performing calculations, analysing the results obtained.

Pavel A. Pavlov. Collection and analysis of indicators of the functioning of road transport in the multimodal logistics system of grain transportation.

Andrey A. Kulikov. Search and analysis of literary sources according to the proposed research objectives.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Куликов Алексей Викторович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильные перевозки».

Близнякова Елена Александровна – студентка кафедры «Автомобильные перевозки».

Павлов Павел Алексеевич – директор ООО «АЛЬФА ТРЕЙД», магистрант кафедры «Автомобильные перевозки».

Куликов Андрей Алексеевич – студент кафедры «Автомобильные перевозки».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Kulikov – Dr. of Sci., Associate Professor, Automobile Transportation Department.

Elena A. Bliznyakova – student of the Automobile Transportation Department.

Pavel A. Pavlov – Director of ООО ALFA TRADE, Master's student of the Automobile Transportation Department.

Andrey A. Kulikov – student of the Automobile Transportation Department.

УДК 62-51

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>

EDN: RLLOOR

Научная статья



РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ УЧАСТКА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. Юнг*, А. Г. Шевцова

*Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Россия**yungnastena33@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0691-1393>**shevcova-anastasiya@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0691-1393>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день существует острая проблема повышения количества дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности (СИМ). Резкое повышение на дорогах общего пользования данных средств создаёт угрозу как для водителей транспортных и индивидуальных средств, так и для пешеходов.

Материалы и методы. В данной статье представлены результаты оценки характеристик транспортного потока при движении средств индивидуальной мобильности в различных условиях с помощью моделирования участка дорожного движения. Цель исследования заключается в получении реальных значений характеристик транспортного потока для дальнейшего их анализа и сравнения, что в будущем позволит снизить аварийность дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности. Предлагается использование метода моделирования для анализа характеристик транспортного потока, изменяющихся с появлением данных средств. Задачами исследования является анализ количества и видов ДТП с участием средств индивидуальной мобильности, выделение конфликтных зон при взаимодействии средств индивидуальной мобильности с другими участниками движения, выбор участка дорожной среды, подлежащий моделированию. Приводятся как положительные, так и отрицательные стороны внедрения СИМ в повседневную жизнь населения, кратко рассмотрены основные виды и характеристики средств индивидуальной мобильности. С помощью программы имитационного моделирования Aimsun удалось создать модели участка дорожной сети с введением средств мобильности в различные дорожные ситуации для оценки их влияния на транспортный поток.

Результаты. Создана модель дорожного участка, позволяющая автоматизировать процесс обработки информации и рассмотреть различные ситуации передвижения СИМ в городской среде, что позволит далее в сравнительном анализе выбрать наиболее безопасные условия для передвижения данных средств.

Обсуждение и заключение. Использование данного метода моделирования позволит увеличить скорость исследования и помочь наиболее четко определить, как изменяются характеристики транспортного потока в представленных ситуациях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мобильность, моделирование, оценка, дорожное движение, пешеход, характеристики, условия передвижения, угроза, средства индивидуальной мобильности

Статья поступила в редакцию 07.05.2022; одобрена после рецензирования 02.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Юнг А. А., Шевцова А. Г. Результат оценки характеристик транспортного потока с учетом движения средств индивидуальной мобильности с помощью моделирования участка дорожного движения // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 716-726. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>

© Юнг А. А., Шевцова А. Г., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>
EDN: RLLOOR

RESULT OF AN EVALUATION FOR TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS CONSIDERING THE MOVEMENT OF PERSONAL MOBILITY DEVICES BY MODELLING A ROAD TRAFFIC SECTION

Anastasia A. Jung*, Anastasia G. Shevtsova

Shukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

yungnastena33@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0691-1393>
shevcova-anastasiya@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0691-1393>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Today there is an acute problem of increasing the number of accidents involving personal mobility devices (PMD). A sharp increase in these vehicles on public roads poses a threat to both vehicle drivers and pedestrians.

Materials and methods. In this article, the results of the evaluation of the traffic flow characteristics of individual mobility devices under different conditions with the help of road section modelling are presented. The aim of the study is to obtain real values of traffic flow characteristics for further analysis and comparison, which in the future will reduce the accident rate with the participation of personal mobility devices. It is suggested a modelling method to be used to analyse the characteristics of traffic flow changing with the introduction of these devices. The objectives of the study are to analyse the number and types of accidents involving personal mobility devices, to identify conflict zones in the interaction of personal mobility devices with other road users, and to select the road environment to be modelled. Both positive and negative aspects of the introduction of PMD in everyday life are presented, and the main types and characteristics of personal mobility devices are briefly considered. Aimsun simulation software was used to create models of a road network section with the introduction of mobility devices in various traffic situations to evaluate their impact on traffic flow.

Results. A road section model has been created to automate information processing and to consider different situations of PMD movement in an urban environment, which will allow further comparative analysis to select the safest conditions for the movement of these vehicles.

Discussion and conclusions. The use of this modelling method will increase the speed of the study and help to determine most clearly how traffic flow characteristics change in the situations presented.

KEYWORDS: mobility, modelling, evaluation, traffic, pedestrian, characteristics, conditions, movement, threat, personal mobility devices.

The article was submitted 07.05.2022; approved after reviewing 02.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: A. A. Jung, A. G. Shevtsova The result of an evaluation for traffic flow characteristics considering the movement of personal mobility equipment by modeling a road traffic section. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 716-726. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>

© Jung A. A., Shevtsova A. G., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность дорожного движения – актуальная задача для каждого субъекта Российской Федерации [1]. В России для планирования действий по повышению БДД является Стратегия Безопасности дорожного движения в России на 2018–2024 гг. Долгосрочной национальной целью является «стремление к нулевой смертности в ДТП к 2030 г.», что соответствует мировым приоритетам. Новые виды средств передвижения всё чаще появляются на дорогах общего пользования, так как развитие в современном обществе не стоит на месте, исключением не являются устройства уже с закрепленным за ними термином «средства индивидуальной мобильности» [2]. Передвижение человека посредством электродвигателя (электросамокат, электроскейтборд, сегвей, моноколесо, гироскутер) или мускульной энергии (самокат, роликовые коньки, скейтборд) подходит под данное определение. Развитие средств индивидуальной мобильности в отечественной практике произошло не так давно, а именно с 2017 г. они стали активно появляться в жизни населения, так с 13 февраля по 13 марта 2022 г. жители страны заказали на 235% больше электросамокатов, чем в аналогичный период прошлого года (статистика Wildberries) (рисунок 1) [3].

За последние шесть лет сменилось несколько поколений электротранспорта [4]. Рынок наполняется различными моделями, которые в свою очередь постоянно модифицируются и приобретают новые формы и воз-

можности использования: гироскутер, сигвей, моноколесо, электросамокат, электровелосипед, электротраки и др. [5].

Для того, чтобы сократить пользование общественным транспортом, население все чаще использует электросамокаты, гироскутеры, моноколеса, электровелосипеды. Например, в группе «М.Видео-Эльдорадо» только в июне 2020 г. прирост продаваемости СИМ составил 25 и 70% в денежном эквиваленте по сравнению с июнем прошлого года. В сети магазинов «Позитроника» спрос на электросамокаты летом 2020 г. вырос в два раза по сравнению с прошлогодними показателями. Почти втрое вырос спрос на некоторые виды СИМ и на сайте объявлений Авито [6].

В крупных городах нашей страны (Москва, Санкт-Петербург) процент населения передвигающихся на СИМ увеличивается с каждым годом в геометрической прогрессии. Областные административные центры также не остаются в стороне, местные жители из-за большого количества положительных факторов данных средств (экономия времени, денежных средств, исключение лишних контактов с людьми и т. д.) всё чаще выбирают для передвижения СИМ. Однако есть как положительные, так и отрицательные стороны использования СИМ. Эксплуатация данных средств на дорогах общего пользования становится серьезным фактором повышенной опасности как для пешеходов и водителей ТС, так и для лиц, управляющих такими устройствами [7].

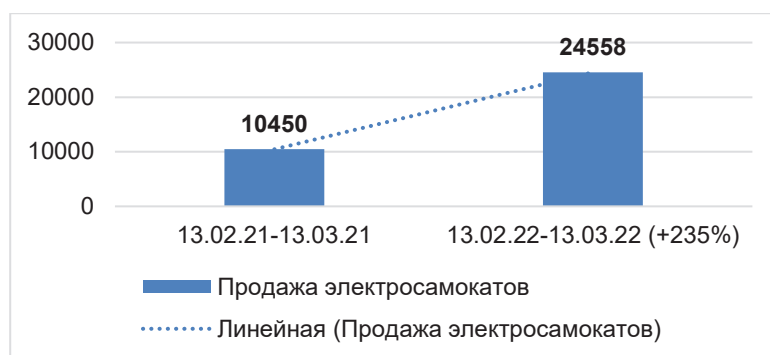


Рисунок 1 – Процент увеличения продаваемости СИМ на платформе Wildberries
Источник: статистика Wildberries.

Figure 1 – Percentage increase in PMD sales on the Wildberries platform
Source: Wildberries statistics



Рисунок 2 – Количество ДТП с участием средств индивидуальной мобильности в РФ 2017–2020 гг.
Источник: статистика НИЦ БДД.

Figure 2 – Number of accidents involving personal mobility devices in Russia in 2017–2020
Source: Scientific Centre for Road Safety statistics.

Лица, использовавшие способ передвижения на средствах индивидуальной мобильности, часто становятся участниками ДТП. Зарегистрированы случаи участия несовершеннолетних в подобных происшествиях.

Согласно официальным данным научно-исследовательского центра безопасности дорожного движения (НИЦ БДД) (рисунок 2) количество ДТП в 2020 г. с участием СИМ в России составило 391, прирост составляет 182,9%, что намного больше по сравнению с 2019 г. (см. рисунок 2). И если в 2019 г. с участием средств индивидуальной мобильности произошло 117 дорожно-транспортных происшествий, в которых телесные повреждения получили 122 человека, а погибло 4, то уже по данным 2020 г. эти показатели были превышены – 347 (+184,4%) раненых и 6 (+50%) погибших (см. рисунок 2).

Существует 5 видов ДТП с участием средств индивидуальной мобильности: наезд на пешехода, столкновение, опрокидывание, наезд на лицо, не являющееся участником дорожного движения, осуществляющее производственные работы и иной вид (рисунок 3) [8].

Из представленных диаграмм видно, что самым популярным видом ДТП является наезд на пешехода, из чего можно сделать вывод, что движение средств индивидуальной мобильности по пешеходной зоне не является безопасным [9].

СИМ не являются только сезонным видом транспорта, как это кажется на первый взгляд. Аварийность в южных городах России происходит на протяжении всего года [10].



Рисунок 3 – Виды ДТП с участием средств индивидуальной мобильности 2020 г.
Источник: статистика НИЦ БДД.

Figure 3 – Types of accidents involving personal mobility devices in 2020
Source: Scientific Centre for Road Safety statistics.

При рассмотрении аварийности можно подумать, что ДТП с участием средств индивидуальной мобильности происходят только в осенне-летний и весенне-летний период. Однако при детальном рассмотрении количества ДТП по месяцам года за 2020 г. были выявлены некоторые закономерности (рисунок 4).

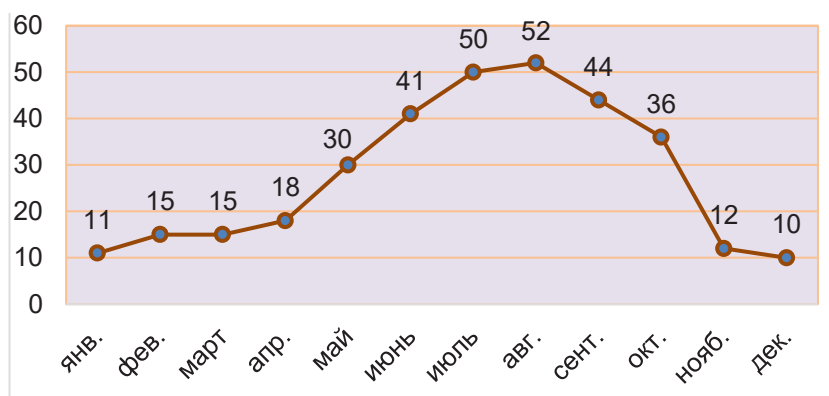


Рисунок 4 – График показателей количества ДТП с участием СИМ по месяцам 2020 г.
Источник: статистика НИЦ БДД.

Figure 4 – Graph of the accidents number involving PMD by month in 2020
Source: Scientific Centre for Road Safety statistics.

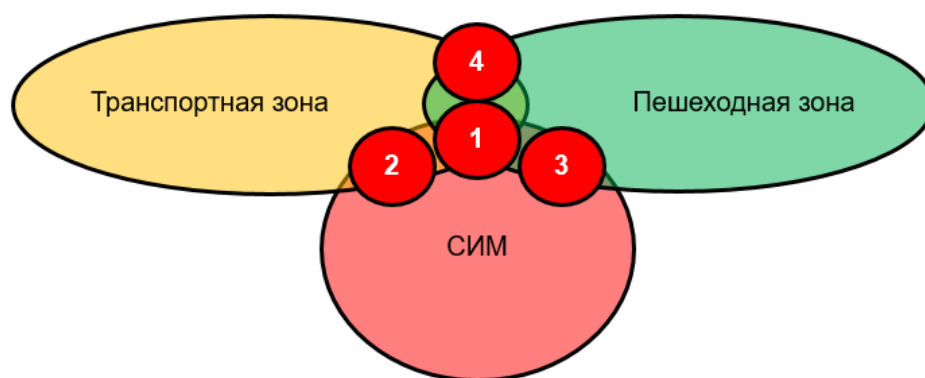


Рисунок 5 – Схема взаимодействия СИМ на улично-дорожной сети
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme of interaction of PMD on the street-road network
Source: compiled by the authors.

Городская среда не адаптирована для передвижения средств индивидуальной мобильности. Большое число дорожно-транспортных происшествий происходит из-за возникновения конфликта между пешеходами и СИМ и водителя ТС и СИМ.

При взаимодействии средств индивидуальной мобильности с городской средой выделяют конфликтные зоны пересечения (рисунок 5):

1 – пересечение трёх областей: транспортной, пешеходной и зоной СИМ. Здесь сосредоточена основная проблема, а именно увеличение дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности. Происходит это из-за того, что передвижения СИМ не регулируются требованиями для комфортного и безопасного движения, а транспортная и пешеходная обеспечены необходимыми правовыми составляющими для четкого регулирования передвижения в данных зонах [11].

2 – конфликтная зона пересечения транспортной зоны и зоны СИМ. Проблема данной области заключается в неспособности идентифицировать средства индивидуальной мобильности в транспортной зоне.

Существует большое количество приложений для отслеживания передвижений СИМ (шеринг электросамокатов и т. д.), однако распознавать данные средства в общем транспортном потоке для мониторинга и исследования передвижения в данный момент невозможно.

3 – зона пересечения пешеходной зоны и зоны СИМ. В данной конфликтной области существует проблема большого количества ДТП с участием средств индивидуальной мобильности. Вид ДТП «Наезд на пешехода» составляет 25% от общего количества ДТП за 2020 г. [12].

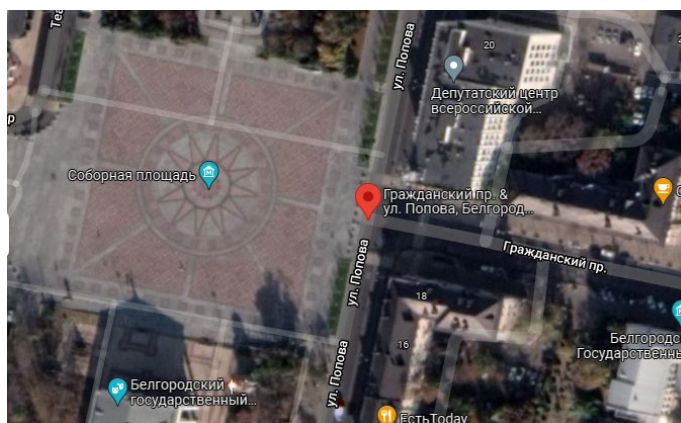


Рисунок 6 – Спутниковый снимок участка ул. Попова – Гражданский пр-т
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Satellite image of the site – Popova St. – Civil Avenue
Source: compiled by the authors.

4 – точка пересечения пешеходной зоны и транспортной зоны осуществляется с помощью пешеходных переходов (подземных, наземных и подземных). В данной области существуют четкие правила и требования, позволяющие создать безопасное взаимодействие данных зон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В результате анализа дорожной сети г. Белгорода определен участок дорожной сети, подлежащий моделированию – Гражданский проспект (рисунок 6), так как данное пространство является местом притяжения большого количества жителей г. Белгорода из-за проведения городских мероприятий (9 мая, День города и т. д.). Участок ул. Попова – Гражданский пр-т ввиду большой загруженности является наиболее подходящим вариантом для моделирования и внесения определенных изменений в организацию дорожного движения [13].

По ул. Попова в утренний час пик интенсивность индивидуального транспорта с южного направления составляет 1214 ед./ч, с северного – 640 ед./ч, по Гражданскому пр-ту – 356 ед./ч. Создание имитационной модели на данном участке дороги является правильным решением еще с точки зрения распределения крупных точек притяжения – Драмтеатр, Соборная площадь, парковка прокатных электросамокатов и велосипедов, большое количество коммерции на первых этажах зданий [14].

Для снижения возникновения данных конфликтов первоначальным этапом является

определение условий передвижения средств индивидуальной мобильности, а именно разделение или выделение специализированного пространства. Для проведения дальнейших исследований необходимо определить, как средства индивидуальной мобильности влияют на транспортный поток. С этой целью был выполнен анализ моделей дорожного движения с участием СИМ [15].

Программа имитационного моделирования Aimsun позволила создать модели участка дорожной сети с различным влиянием средств индивидуальной мобильности на условия движения (рисунок 7). Данная программа предоставляет возможность осуществить не только статистическое, но и динамическое моделирование, что значительно упрощает общее восприятие дорожной ситуации. Создана модель дорожного участка, позволяющая автоматизировать процесс обработки информации, а также помощь, с учетом рассмотрения нескольких моделей передвижения средств индивидуальной мобильности выбрать наиболее подходящую [16]. Применение данной программы позволит значительно ускорить процесс обработки информации характеристик транспортного потока, необходимой для проведения оценки сложившейся ситуации [17].

С помощью программы имитационного моделирования Aimsun и получения данных характеристик транспортного потока необходимо выяснить, как влияет передвижение средств индивидуальной мобильности на движение транспортного потока. Для более четко-

го принятия решения о передвижении СИМ в дорожной среде требуется создать несколько дорожных ситуаций-моделей:

1. Модель 1 – исходная модель движения на перекрестке, без участия СИМ.

2. Модель 2 – исходная модель с наличием в ТП – 15% СИМ по каждому направлению в общем потоке, без выделения специализированной инфраструктуры для движения.

3. Модель 3 – исходная модель с наличием в ТП – 15% СИМ по каждому направлению в общем потоке, с выделением специализированной инфраструктуры для движения – велосипедных дорожек шириной 2 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью данной программы можно совершить выгрузки определенных характеристик транспортного потока в разрезе утренний час пик, меж пик и вечерний час пик по трём вышеперечисленным моделям (рисунок 8) (таблица 1).

Рассмотрим модели движения в утренний час пик. Для более четкого понимания переведем значения скорости, задержек и времени пути в абсолютные показатели (таблица 2).

На данном пересечении без внедрения СИМ интенсивность движения в утреннее время составляет 2210 ед./ч, в вечернее время – 2032 ед./ч, в межпиковое время – 1517 ед./ч.

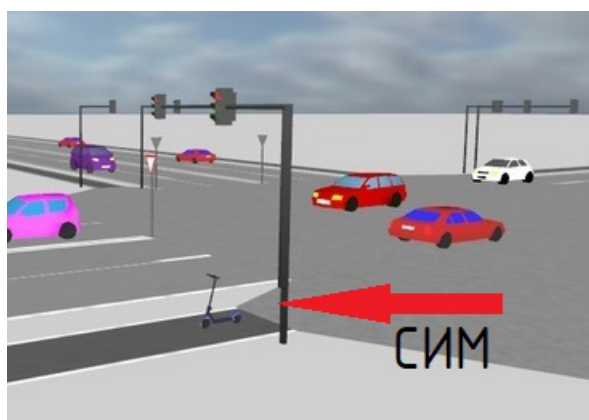


Рисунок 7 – Имитационная модель ул. Попова – Гражданский пр-т с выделением специализированной инфраструктуры для движения СИМ, программа Aimsun
Источник: составлено авторами.

Figure 7 - Simulation model of Popova Street – Civil Avenue with the allocation of specialized infrastructure for PMD traffic, Aimsun program
Source: compiled by the authors.

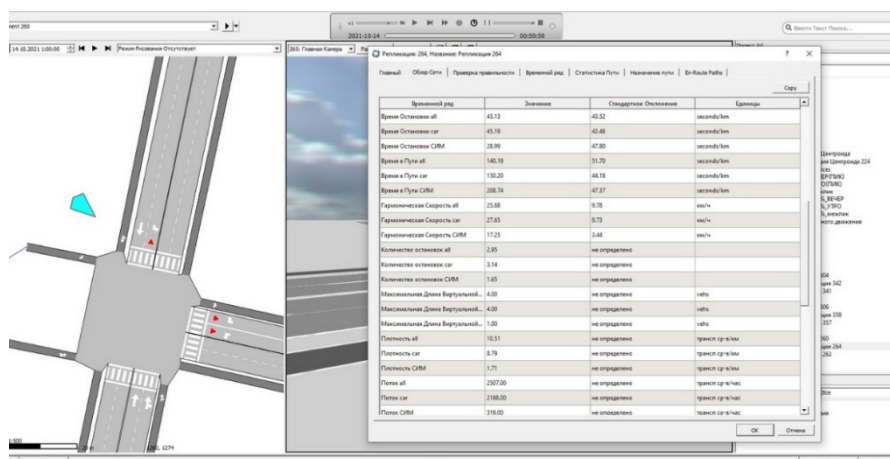


Рисунок 8 – Получение характеристик транспортного потока с участием средств индивидуальной мобильности, с помощью программы Aimsun
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Obtaining characteristics of the traffic flow with the participation of personal mobility devices, using the Aimsun program
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Характеристики транспортного потока ул. Попова – Гражданский проспект
Источник: составлено авторами.

Table 1
Characteristics of the traffic flow of Popova Street – Civil Avenue
Source: compiled by the authors.

	Без СИМ	СИМ 15%	СИМ с велодорожками
	Скорость, км/ч		
Утренний ПИК	32,06	27,64	29,03
Меж ПИК	33,97	30,26	30,72
Вечерний ПИК	32,82	28,07	28,89
	Задержки, с/км		
Утренний ПИК	50,66	61,53	54,49
Меж ПИК	43,5	48,56	45,97
Вечерний ПИК	48,36	58,41	53,99
	Время в пути, с/км		
Утренний ПИК	27,04	36,97	33,17
Меж ПИК	16,82	22,38	21,93
Вечерний ПИК	23,89	32,57	31,65

Таблица 2
Абсолютные показатели характеристик транспортного потока
Источник: составлено авторами.

Table 2
Absolute indicators of traffic flow characteristics
Source: compiled by the authors.

	Скорость	Задержки	Время в пути
Без СИМ	1	1	1
СИМ 15%	0,862	1,214	1,367
СИМ 15% велодорожки	0,905	1,075	1,226

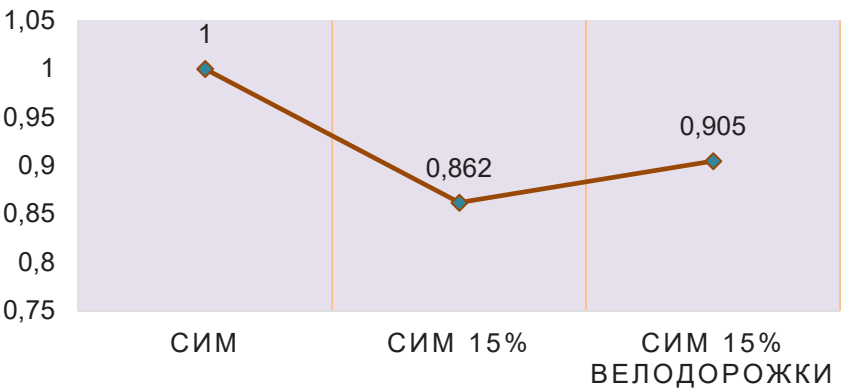


Рисунок 9 – Показатели скорости транспортного потока для движения без СИМ
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Indicators of traffic flow speed for movement without PMD
Source: compiled by the authors.

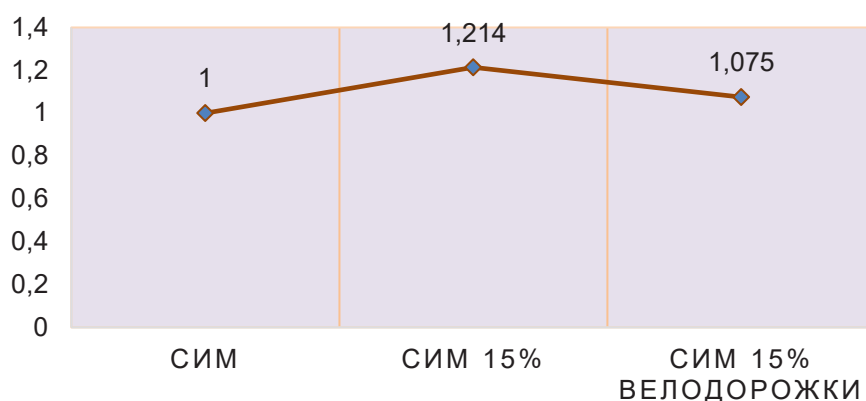


Рисунок 10 – Показатели задержек транспортного потока для движения без СИМ
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Indicators of traffic delays for traffic without PMD
Source: compiled by the authors.

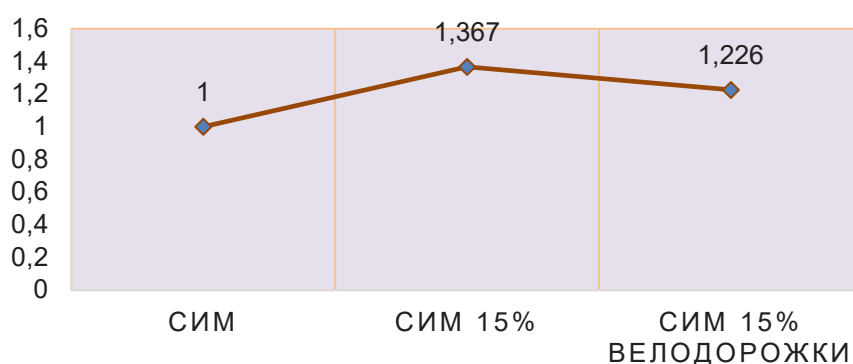


Рисунок 11 – Показатели времени пути транспортного потока для движения без СИМ
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Indicators for the travel time of the traffic flow for movement without PMD
Source: compiled by the authors.

Из представленного графика видно, что скорость транспортного потока с появлением СИМ на дорогах общего пользования падает на 14%, при передвижении данных средств на велосипедных дорожках скорость потока также падает, но уже всего лишь на 9% (рисунок 9).

Из представленного графика видно, что задержки транспортного потока с появлением СИМ на дорогах общего пользования увеличиваются на 22%, при передвижении данных средств на велосипедных дорожках скорость потока также падает, но уже всего лишь на 8% (рисунок 10).

Из представленного графика видно, что задержки транспортного потока с появлением СИМ на дорогах общего пользования увеличиваются на 36%, при передвижении данных средств на велосипедных дорожках скорость потока также падает, но уже всего лишь на 22% (рисунок 11).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе полученных результатов предлагается выделить отдельные полосы движения для СИМ либо велодорожки для движения СИМ/велосипедов. В результате оценки различных моделей установлено, что СИМ могут двигаться в потоке с разрешенной скоростью потока, но в результате можно предположить резкий скачок аварийности [18]. Разница в габаритах между автомобилями и средствами индивидуальной мобильности способствует движению СИМ между полосами, а также отличие в маневренности данных средств приведет к увеличению дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности [19]. Именно поэтому существует потребность в дальнейших исследованиях для определения комфортной среды передвижения для средств индивидуальной мобильности.

Появление СИМ на дорогах общего пользования становится неизбежной проблемой современной жизни, именно поэтому при сравнении характеристик транспортного потока (скорости, задержек и времени в пути) можно заметить негативную тенденцию при внедрении средств индивидуальной мобильности в общий транспортный поток, резкое уменьшение скорости движения транспортных средств (-13,7%), увеличение задержек (+21,4%) и времени в пути (+36,7%). При выделении специализированного пространства, а именно велосипедных дорожек шириной 2 м, также можно заметить негативное влияние, однако оно значительно меньше при модели 2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ирошников Д. В. Правовые проблемы обеспечения безопасности личности на транспорте в условиях использования индивидуального электротранспорта / Д. В. Ирошников // Правовое государство: теория и практика. 2019. № 1/1. С. 58–89.
2. Мишина Ю. В. К вопросу об участии в дорожном движении пользователей средств индивидуальной мобильности / Ю. В. Мишина // Правопорядок: история, теория, практика. 2020. № 1/2. 24 с.
3. Юнг А. А. Оценка аварийности средств индивидуальной мобильности в различных условиях движения / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова // Современная наука. 2021. № 2. С. 31–36.
4. Новиков И. А. Влияние изменения задержек транспортных средств на количество режимов работы светофорного объекта / И. А. Новиков, А. Г. Шевцова // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 4(35). С. 62–68.
5. Боровской А. Е. Методы определения потока насыщения автотрассы / А. Е. Боровской, А. Г. Шевцова // Мир транспорта. 2013. № 3. С. 44–51.
6. Боровской А. Е. Распределение состава транспортного потока на примере городской агломерации «Белгород» [Текст] / А. Е. Боровской, П. А. Воля, И. А. Новикова, А. Г. Шевцова // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 4. С. 103–110.
7. Шелмаков П. С. Развитие велосипедного движения в Российской Федерации / П. С. Шелмаков, С. В. Шелмаков // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 183–184.
8. Сойников С. А. Особенности определения административно-правового статуса участников дорожного движения, использующих современные технические средства передвижения (средства индивидуальной мобильности) / С. А. Сойников // Вестник экономической безопасности. 2020. № 1. С. 216–219.
9. Волков П. А. Средства индивидуальной мобильности: вопросы теории и практики использования / П. А. Волков, Ю. В. Кемаш // Вестник Белгородского юридического института МВД России им. И. Д. Путилина. 2021. № 1. С. 51–55.
10. Мишина Ю. В. Проблемы определения административно-правового статуса лиц, использующих для передвижения электросамокаты, сегвеи и иные

современные технические средства Ю. В. Мишина // Проблемы экономики и юридической практики. 2020. № 4. С. 321–325.

11. Novikov A., Glagolev S., Novikov I., Shevtsova A. A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICIAE 2019. C. 012052.

12. Trofimenko Y., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 3. Ser. "International Conference on Sustainable Cities" 2018. C. 012014.

13. Trofimenko Y. V., Komkov V. I., Potapchenko T. D., Donchenko V. V. Model for the assessment of greenhouse gas emissions from road transport. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. T. 7. No 1. C. 465–473.

14. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I., Grigoryeva T. Yu. Forecast of the vehicle fleet size and structure in Russian Federation by ecological class, a type of power installations and a fuel type for the period up to 2030. Proceedings of the Sixth International Environmental Congress (Eighth International Scientific-Technical Conference) "Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes" ELPIT 2017. 2017. P. 311–326.

15. Nocerino R., Colorni, A., Lia, F. Luè, A. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. Transp. Res. Procedia 2016, 14, 2362–2371.

16. Degele J., Gorr A., Haas K., Kormann, D., Krauss S., Lipinski P., Tenbih M., Koppenhoefer C., Fauser J., Hertweck D. Identifying E-scooter sharing customer segments using clustering. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart, Germany, 17–20 June 2018; pp. 2–5.

17. Zagorskis J., Burinskiene M. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European // Cities Sustainability 2020, 12, 248.

18. OECD/ITF. (2020). Safe Micromobility. Available at: <https://www.itf-oecd.org/safe-micromobility>

19. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. Journal of Applied Engineering Science. 2019. T. 17. No 2. pp. 175–181.

REFERENCES

1. Iroshnikov D. V. Pravovye problemy obespecheniya bezopasnosti lichnosti na transporte v usloviyakh ispol'zovaniya individual'nogo elektrottransporta [Legal problems of ensuring personal safety in transport in the conditions of using individual electric transport]. *Pravovoe gosudarstvo: teoriya i praktiki*. 2019; 1/1: 58–89. (in Russ.)

2. Mishina Y. V. K voprosu ob uchastii v dorozhnom dvizhenii pol'zovatelej sredstv individual'noj [On the issue of participation in road traffic of users of personal

protective equipment]. *Pravovoe gosudarstvo: teoriya i praktiki*. 2020; 1/2: 24. (in Russ.)

3. Jung A. A., Shevtsova A. G. Ocenka avarijnosti sredstv individual'noj mobil'nosti v razlichnykh usloviyakh dvizheniya [Assessment of the accident rate of individual mobility equipment in various traffic conditions]. *Sovremennaya nauka*. 2021; 2: 31-36. (in Russ.)

4. Novikov I. A., Shevtsova A. G. Vliyaniye izmeneniya zaderzhek transportnykh sredstv na kolichestvo rezhimov raboty svetofornogo ob"ekta [The effect of changes in vehicle delays on the number of modes of operation of a traffic light object]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2011; 4(35): 62-68. (in Russ.)

5. Borovskoi A. E., Shevtsova A. G. Metody opredeleniya potoka nasyshcheniya [Methods for determining the saturation flow]. *Mir transporta*. 2013; 3: 44-51. (in Russ.)

6. Borovskoi A. E., Volya P. A., Novikov I. A., Shevtsova A. G. Raspredeleniye sostava transportnogo potoka na primere gorodskoj aglomeratsii «Belgorod» [Distribution of the composition of the traffic flow on the example of the urban agglomeration "Belgorod"]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2015; 4: 103-110. (in Russ.)

7. Shelmakov P. S., Shelmakov S. V. Razvitiye velosipednogo dvizheniya v Rossijskoj Federatsii [Development of cycling in the Russian Federation]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012; 6: 183-184. (in Russ.)

8. Soynikov S. A. Osobennosti opredeleniya administrativno-pravovogo statusa uchastnikov dorozhnogo dvizheniya, ispol'zuyushchikh sovremennye tekhnicheskie sredstva peredvizheniya (sredstva individual'noj mobil'nosti) [Features of determining the administrative and legal status of road users using modern technical means of transportation (means of individual mobility)]. *Vestnik jekonomicheskoy bezopasnosti*. 2020; 1: 216-219. (in Russ.)

9. Volkov P. A., Kemyash Yu. V. Sredstva individual'noj mobil'nosti: voprosy teorii i praktiki ispol'zovaniya [Means of individual mobility: issues of theory and practice of use]. *Vestnik Belgorodskogo juridicheskogo instituta MVD Rossii im. I. D. Putilina*. 2021; 1: 51-55. (in Russ.)

10. Mishina Yu. V. Problemy opredeleniya administrativno-pravovogo statusa lic, ispol'zuyushchikh dlya peredvizheniya elektrosamokaty, segvey i inye sovremennye tekhnicheskie sredstva [Problems of determining the administrative and legal status of persons using electric scooters, segways and other modern technical means for movement]. *Problemy jekonomiki i juridicheskoy praktiki*. 2020; 4: 321-325. (in Russ.)

11. Novikov A., Glagolev S., Novikov I., Shevtsova A. A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019. C. 012052.

12. Trofimenko Y., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science. 3. Ser. "International Conference on Sustainable Cities" 2018. P. 012014.

13. Trofimenko Y. V., Komkov V. I., Potapchenko T. D., Donchenko V. V. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019; T. 7. No 1: 465-473.

14. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I., Grigoryeva T. Yu. Forecast of the vehicle fleet size and structure in Russian federation by ecological class, a type of power installations and a fuel type for the period up to 2030. *Proceedings of the Sixth International Environmental Congress (Eighth International Scientific-Technical Conference) "Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes" ELPIT 2017*. 2017. P. 311-326.

15. Nocerino R., Colorni, A., Lia, F. Luè, A. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. *Transp. Res. Procedia* 2016, 14, 2362-2371.

16. Degele J., Gorr A., Haas K., Kormann, D., Krauss S., Lipinski P., Tenbih M., Koppenhoefer C., Fauser J., Hertweck D. Identifying E-scooter sharing customer segments using clustering. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Germany, 17-20 June 2018; pp. 2-5.

17. Zagorskis J., Burinskiene M. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European // *Cities Sustainability* 2020, 12, 248.

18. OECD/ITF. (2020). Safe Micromobility. Available at: <https://www.itf-oecd.org/safe-micromobility>

19. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; T. 17. No 2: 175-181.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Шевцова А. Г. Постановка цели и задачи исследования.

Юнг А. А. Выполнение оценки характеристик транспортного потока.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Anastasia G. Shevtsova. Statement of the aims and objectives of the study.

Anastasia A. Jung. Performing a traffic flow characterisation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевцова Анастасия Геннадьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта».

Юнг Анастасия Алексеевна – магистрант кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia G. Shevtsova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Motor Vehicle Operation and Management Department.

Anastasia A. Jung – Master's student of the Motor Vehicle Operation and Management Department.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК 691.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

EDN: RRVNRN

Научная статья



ВЫВЕТРЕННЫЕ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ – СЫРЬЕ СТРОЙИНДУСТРИИ

В. С. Лесовик^{1,2}, Е. В. Фомина^{*1,2}, И. А. Черепанова¹, А. Н. Ряпухин¹

¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации,
г. Москва, Россия

naukavs@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2378-3947>

fomina.katerina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0542-0963>

inst703@intbel.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2590-8755>

ryapukhin.an@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6935-8452>

^{*}ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Обсуждаются особенности состава и строения кварцитопесчаников Курской магнитной аномалии, затронутых процессами выветривания, которые не удовлетворяют требованиям нормативных документов для получения щебня. Запасы этих пород не были утверждены как полезные ископаемые и по настоящее время складываются в виде многотоннажных отвалов на территории комбината. Основная задача, определяемая в рамках работы, направлена на решение вопроса расширения сырьевой базы строительной отрасли.

Материалы и методы. Оценка эффективности использования выветренного кварцитопесчаника основана на исследовании показателей физико-химических свойств. Анализ минеральных пород проводился с применением цифровой микроскопии, метода рентгенофазового анализа. Проведены экспериментальные исследования кинетики помола сырья. Активность композиционных вяжущих с применением выветренного кварцитопесчаника изучали в соответствии с ГОСТ 30744–2001.

Результаты. Показано, что генетические особенности выветренных кварцитопесчаников обусловлены дефектной кристаллической структурой кварца, также они отличаются низкой морозостойкостью и прочностью. Эффективность помола выветренного кварцитопесчаника в 4 раза выше в сравнении с невыветренным. Установлено, что применение этого сырья для получения композиционных вяжущих позволяет сократить долю портландцемента в смеси до 50% и повысить прочность композиционного вяжущего на 20%.

Обсуждение и заключение. С учетом современных тенденций перехода строительной отрасли на многокомпонентные составы выветренный кварцитопесчаник целесообразно применять в качестве нетрадиционного кварцевого сырья при получении энергоэффективных строительных композитов нового поколения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выветренный кварцитопесчаник, техногенное сырье, энергоэффективность, геоника (геомиметика), ресурсосбережение, экология.

Исследование выполнено в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 3.1.2.6., 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 26.07.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Лесовик В. С., Фомина Е. В., Черепанова И. А., Ряпухин А. Н. Выветренные кварцито-песчаники Курской магнитной аномалии – сырье стройиндустрии // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

© Лесовик В. С., Фомина Е. В., Черепанова И. А., Ряпухин А. Н., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

EDN: RRVNRN

WEATHERED QUARTITE SANDSTONES OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY AS A RAW MATERIAL FOR CONSTRUCTION INDUSTRY

Valery S. Lesovik^{1,2}, Ekaterina V. Fomina^{1,2}, Irina A. Cherepanova¹, Alexander N. Ryapukhin¹

¹ Shoukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

² Central Research and Design Institute of the Ministry for Construction and Housing and Communal
Services of the Russian Federation,
Moscow, Russia

naukavs@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2378-3947>

fomina.katerina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0542-0963>

inst703@intbel, <http://orcid.org/0000-0003-2590-8755.ru>

ryapukhin.an@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6935-8452>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The features of composition and structure of quartzitic sandstones of the Kursk Magnetic Anomaly affected by weathering processes, which do not meet the requirements of normative documents for obtaining crushed rock, are considered. The reserves of these rocks have not been approved as minerals and are currently stored in the form of large-tonnage dumps on the territory of the plant.

The main challenge to be solved within the framework of the work is aimed at solving the issue of expanding the raw material base of the construction industry.

Materials and methods. Efficiency evaluation of the weathered quartzite sandstone use is based on the study of indicators of physical and chemical properties. The analysis of mineral rocks was carried out using digital microscopy, the method of X-ray phase analysis. The experimental studies of the kinetics of grinding raw materials have been carried out. The activity of composite binders using weathered quartzite sandstone was studied in accordance with GOST 30744-2001.

Results. It is shown that genetic features of weathered quartzitic sandstones are caused by defective crystal structure of quartz, they are also characterised by low frost resistance and strength. The grinding efficiency of weathered quartzite sandstone is 4 times higher in comparison with untethered. It has been established that the use of these raw materials to produce composite binders makes it possible to reduce the proportion of Portland cement in the mixture by up to 50% and increase the strength of the composite binder by 20%.

Discussion and Conclusions. In consideration of current trends in the transition of the construction industry to multicomponent compositions, it is advisable to use weathered quartzite sandstone as an unconventional quartz raw material in obtaining energy-efficient building composites of a new generation.

KEYWORDS: weathered quartzite sandstone, technogenic raw materials, energy efficiency, geonics (geomimetics), resource saving, ecology.

The study was carried out within the framework of the Basic Scientific Research Plan of the Ministry of Construction of Russia and the RAASN, topic 3.1.2.6., Grant of the Russian National Research Fund No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 of 24.03.2022.

The article was submitted 26.07.2022; approved after reviewing 29.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Lesovik V. S., Fomina E. V., Cherepanova I. A., Ryapukhin A. N. Weathered quartite sandstones of the Kursk magnetic anomaly as a raw material for construction industry. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

© Lesovik V. S., Fomina E. V., Cherepanova I. A., Ryapukhin A. N., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность строительных материалов отличается от других отраслей консервативностью в использовании сырья. Уже несколько столетий основными горными породами, которые используются для производства щебня, материалов автоклавного твердения, портландцементного клинкера, керамических материалов, являются граниты, пески, известняки и глины. Применяемое в настоящее время традиционное сырье изучалось и развивалось 30–50 лет назад для производства бетонов с прочностью до 30–50 МПа, и требования к нему были соответствующие. Это привело к высокой энергоемкости производства строительных материалов и росту транспортных расходов. Кроме этого, отмечается существенное ухудшение качества минерального сырья [1, 2]. Становление строительного материаловедения, развитие горнодобывающей промышленности, а также специфика геологического строения территории Российской Федерации ориентируют на поиск новых видов сырья, которое более подготовлено геологическими и техногенными процессами для производства того или иного строительного материала. Поиск нового вида сырья является задачей мирового уровня [3, 4]. Именно этим объясняется резко возросшее количество публикаций по исследованию возможности использования в стройиндустрии природных конгломератов, породообразующими минералами которых являются термодинамически активные: опал [5], цеолиты [6], смешаннослойные образования, метаморфогенный кварц, а также сырье, представленное в основном стеклофазой [7].

По данным ЮНЕСКО в мире ежегодно извлекают из недр более 120 млрд т руд, горючих ископаемых и другого сырья. В России ежегодно образуется свыше 5 млрд т отходов, а в отвалах и хранилищах горнодобывающей отрасли страны накоплено около 60 млрд т твердых отходов [8]. Проблема отходов приобрела планетарный характер. Существенно возрастает актуальность использования техногенного сырья. Процесс комплексного использования недр в стройиндустрии затруднен, так как попутно добываемые породы и отходы промышленной переработки рудных полезных ископаемых существенно отличаются от традиционного сырья по генезису, минеральному составу, структуре и текстуре. Это объясняется тем, что экономически целесообразная глубина карьера по добыче сырья

для стройиндустрии около 100 м, а рудные месторождения разрабатываются до 500 м и более. В зону горных работ при этом попадают миллиарды тонн нетрадиционных для стройиндустрии пород, исследование и применение которых требует особых подходов и решений.

Белгородская область находится на территории Курской магнитной аномалии (КМА), где расположен Лебединский горно-обогатительный комбинат, имеющий карьер по добыче железистых кварцитов, диаметром около 5 км, глубиной более 500 м (рисунок 1).

КМА – крупнейший в мире железорудный бассейн по разведанным запасам богатых руд и железистых кварцитов, запасы которых составляют сотни миллиардов тонн.

Кафедрой строительного материаловедения БГТУ им. В.Г. Шухова под научным руководством д-ра техн. наук В. С. Лесовика был выполнен цикл работ по комплексному использованию отходов горнорудного производства. На основании этого утверждены запасы вскрышных и попутно добываемых пород железорудных месторождений КМА.

Благодаря утверждению запасов КМА стройиндустрия Белгородской области обеспечена на столетия кварцитопесчаником, щебень из которого является эффективным заполнителем бетонов (таблица 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При изучении образцов кварцитопесчаника применяли цифровой микроскоп Axio Scope A1.

Съемку РФА проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием излучения Cu-анода (Ni-фильтр для ослабления β -компоненты излучения).

Кинетику помола кварцитопесчаников изучали при помощи шаровой мельницы Retsch PM100 (420 об/мин).

Активность вяжущего изучали в соответствии с ГОСТ 30744–2001. Применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), нормальная плотность цементного теста 28%. Применяли кварцевый песок Разуменского месторождения (Белгородская область). Использовали пластифицирующую добавку – суперпластификатор СП-3 (ООО «ПК Полипласт»). Количество пластифицирующей добавки определяли экспериментальным путем при выявлении оптимального параметра 1% от массы всей смеси. В вяжущем кварцитопесчанике (невыветренный и выветренный) вводили взамен 20 и 50% портландцемента.



Рисунок 1 – Открытый способ разработки Лебединского горно-обогатительного комбината КМА
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Open method of development of the Lebedinsky mining and processing KMA plant
Source: compiled by the author.

Таблица 1
Объемы сырья стройиндустрии Белгородской области
Источник: составлено авторами.

Table 1
The volumes of raw materials of the Belgorod region construction industry
Source: compiled by the author.

Породы	Категория	Запасы по состоянию, тыс. м³		
		Утвержденные запасы	Запасы на 01.01.97 г.	Остаток по разработанным месторождениям
Лебединское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C1	169072	156825	156495
Кварцитопесчаники	B+C1	196026	191110	191008
Глины и суглинки	A+B+C	16830	18345	12146
Стойленское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C1	241366	238839	238839
Терновское месторождение				
Глины	A+B+C1	11448	8092,1	–
Разведанные запасы				
Приоскольское месторождение				
Метаморфические горные породы	C1+C2	47842,3	–	–
Коробковское месторождение (Сретенский участок)				
Кварциты	B+C1	738582	–	–
Метаморфические сланцы	A+B+C1	2163,8	–	–
Висловское месторождение				
Бокситы	A+B+C1	1453	–	–

При проведении эксперимента производили отдельный помол компонентов в шаровой мельнице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кварцитопесчаники относятся к зеленосланцевой степени метаморфизма с породообразующим минералом кварца, отличающимся дефектной структурой кристаллической решетки. Доказано, что применение кварцитопесчаника для получения композиционных вяжущих позволяет существенно снизить расход портландцемента, что актуально при решении задач снижения глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Мощность зоны выветренных кварцитопесчаников составляет от 20 до 50 м. По основным физическим свойствам (плотность, морозостойкость и т. д.) эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых.

Выветривание – это сложный комплекс экзогенных процессов, открытая термодинамическая система, в которой происходят механические, физические, химические и биологические процессы преобразования горных пород в условиях поверхностной части литосферы [16].

При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса гипергенных процессов, в том числе неравномерного нагревания и охлаждения. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры испытывают деформации в различной степени. И в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замораживания и оттаивания в микротрещинах воды и т. д.) кварцитопесчаники распадаются на отдельные обломки.

Визуально породы кварцитопесчаника характеризуются средне- и мелкозернистым сложением (рисунок 2).

При этом порода невыветренного кварцитопесчаника имеет серую окраску со светлыми прожилками (рисунок 2, а). Породы выветривания отличаются сахаровидным обликом с розовато-серой окраской. Также эта разновидность отличается более блеклой окраской и отсутствием специфического блеска (рисунок 2, б).

На основании микроскопического анализа кварцитопесчаник, незатронутый процессами выветривания, сложен зернами, каемки которых представлены в виде темных червеобразных микроборозд (рисунок 3, а).

Приобретение светлых оттенков породы свидетельствует о влиянии процессов выветривания [17], что наблюдается на рисунке 2, б. Выветренная порода сложена обломками зерен кварца. Это согласуется с данными из геологии [18, 19], где отмечается, что в результате процесса выветривания поверхность кварца покрывается сетью параллельных микротрещин, разбивая поверхность кристаллических частиц. На таких раздробленных поверхностях кремнезем легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных корочек, в результате чего зерна становятся округлыми. В условиях высоких pH в процессе диагенеза на кварцевых зернах образуются многочисленные ямки, создающие матовую поверхность зерен. Прослеживаются контуры цементации минеральных зерен в виде регенерационной каймы. По данным работы [17], на поверхности обломочных зерен кварца наблюдаются многочисленные зародышевые, иногда глобулярные образования, соединенные между собой мостиками, между этими зародышами остаются пустоты. Именно эти пустоты формируют линию, заполненную минералообразующей средой предположительно аморфной фазы. Помимо этого, в пространстве породы наблюдаются точечные включения рыжего цвета, принадлежащие соединениям гидрооксида железа.

Изучение фазовой структуры кварцитопесчаника проводили с помощью РФА. В кварцитопесчаниках высокая степень кристалличности основных дифракционных пиков принадлежит кварцу (рисунок 4).

Максимальные отражения дифракционных максимумов в кварцитопесчаниках характерны для альфа-кварца $\alpha\text{-SiO}_2$. Из кристаллических фаз также присутствует небольшое количество альбита $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$. Установлено в работе [18], что кремнезем в раздробленных поверхностях выветренных кварцитопесчаников легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных образований. Данный факт подтверждается на рентгенограмме, где отмечается снижение дифракционных отражений кварца (рисунок 4, б). Диффузные гало в выветренном кварцитопесчанике в области углов отражений $11\text{--}16^\circ 2\theta$ и $27\text{--}29^\circ 2\theta$ указывают о появлении аморфных фаз кремнезема в процессах выветривания.



Рисунок 2 – Разновидности кварцитопесчаников:
 а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Varieties of quartzite sandstones:
 a – unaffected by weathering processes; b – weathered
 Source: compiled by the author.

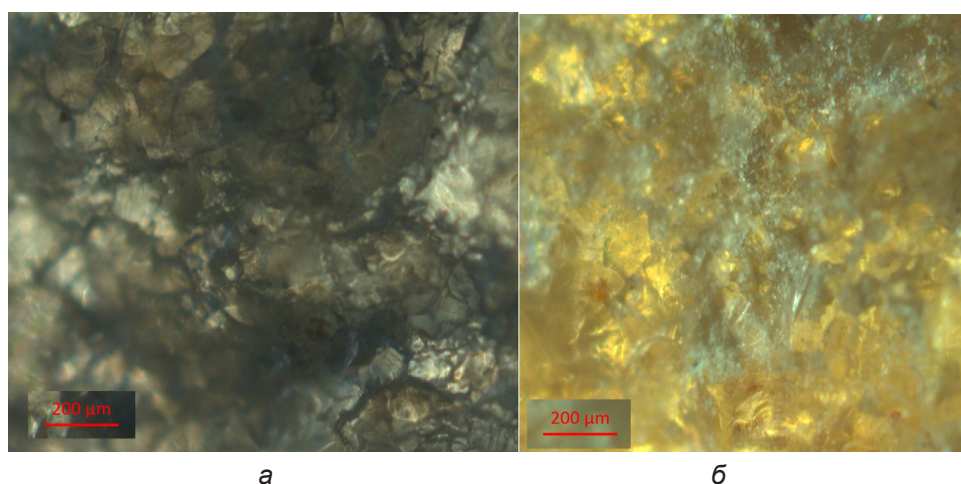


Рисунок 3 – Образцы кварцитопесчаника, изученные при помощи цифрового микроскопа:
 а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Samples of quartzite sandstone studied with a digital microscope
 a – unaffected by weathering processes; b – weathered
 Source: compiled by the author.

Таким образом, данные РФА подтверждают наше предположение о том, что каемка между частицами обломочного кварца представлена цепочкой аморфных минеральных фаз. Отмечается также неустойчивость к процессам выветривания минералов полевых шпатов, интенсивность отражений которых снижается в отличие от разновидности, незатронутой процессами (см. рисунок 4, б).

Эта порода существенно отличается по свойствам от невыветренного кварцитопесча-

ника, запасы которого утверждены в качестве сырья для получения щебня (таблица 2).

Так, предел прочности при сжатии у выветренной породы уменьшается почти в два раза. Морозостойкость снижается в 12 раз, а пористость возрастает в 18 раз.

Кинетика помола кварцитопесчаников представлена на рисунке 5. Исходя из графика, динамика повышения удельной поверхности выветренного кварцитопесчаника значительно опережает размолоспособность невыветренного кварцитопесчаника.

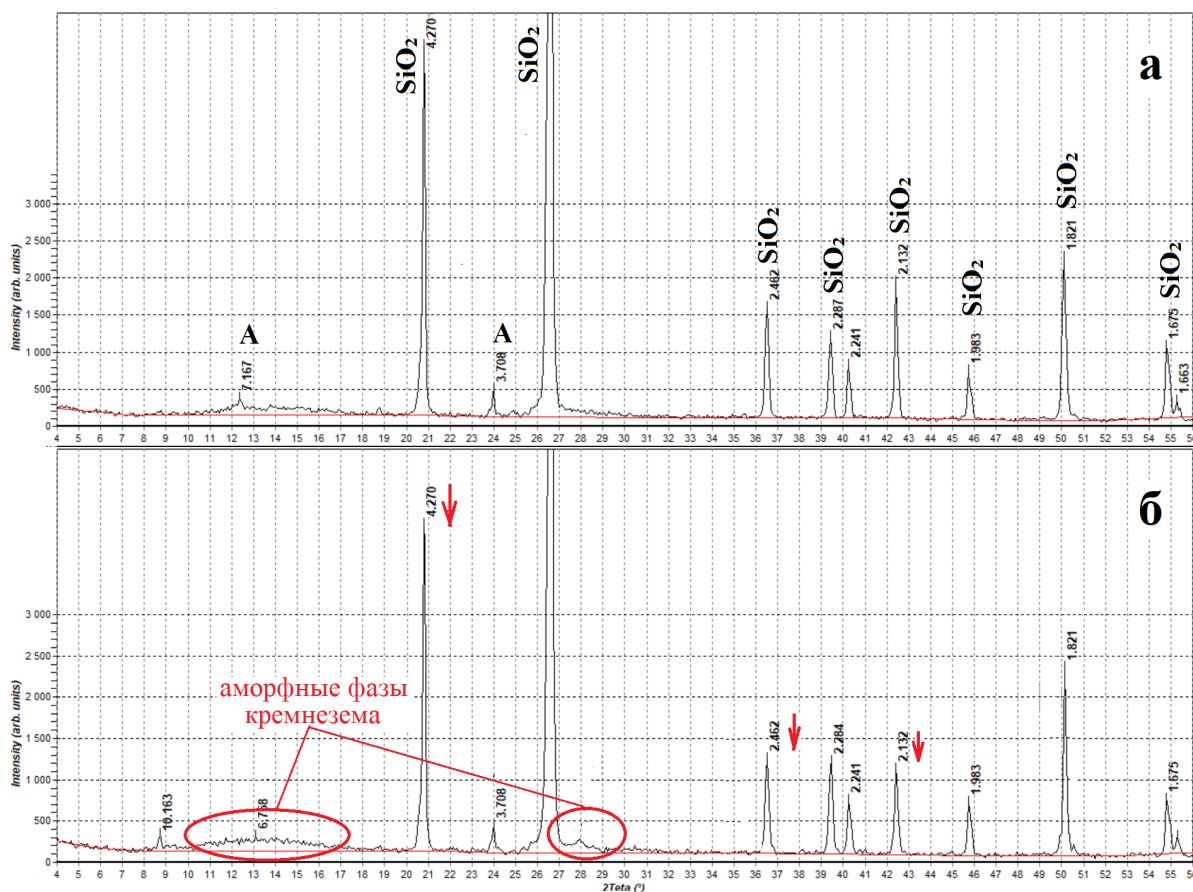


Рисунок 4 – Рентгенограмма кварцитопесчаника:
а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный,
 SiO_2 – альфа-кварц $\alpha\text{-SiO}_2$; А – альбит $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – XRD analysis of quartzite sandstone:
а – unaffected by weathering processes; б – weathered.
 SiO_2 – α -quartz $\alpha\text{-SiO}_2$; А – albite $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$
Source: compiled by the author.

Таблица 2
Сравнительные показатели кварцитопесчаников
Источник: составлено авторами.

Table 2
The comparative indicators of quartzite sandstones
Source: compiled by the author.

Показатель	Невыветренный	Выветренный
Истинная плотность $\rho_{\text{ист}}$, кг/м ³	2650	2600
Средняя плотность, кг/м ³	2630	2290
Пористость, %	0,91	17
Предел прочности при сжатии, МПа	1450	890
Морозостойкость, циклы	250	20

При помоле выветренного кварцитопесчаника в течение 30 мин достигается удельная поверхность 1000 м²/кг, в случае невыветренного КВП время достижения увеличивается в 4 раза.

Кинетика помола выветренного КВП отражает существенную экономическую эффективность в масштабе промышленного производства строительных материалов.

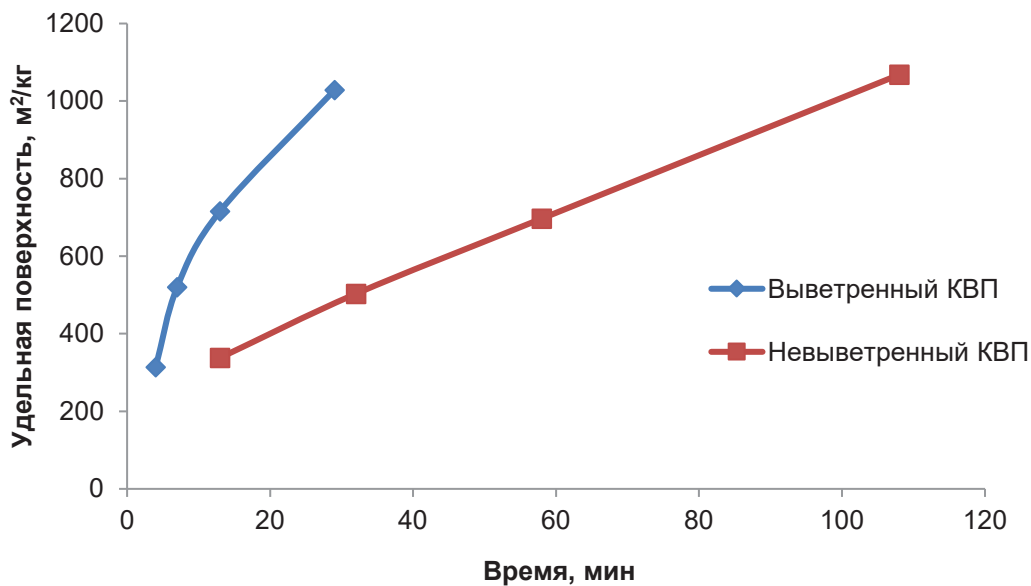


Рисунок 5 – Кинетика помола кварцитопесчаников
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Kinetics of quartzite sandstones grinding
Source: compiled by the author.

Влияние кристаллохимических особенностей выветренных кварцитопесчаников исследовали при взаимодействии с портландцементом. Для приготовления композиционных вяжущих применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), нормальная плотность цементного теста составляла 28%. Проводили домол портланд-цемента до удельной поверхности 500 м²/кг.

Использовали пластифицирующую добавку – суперпластификатор СП-3 (ООО «ПК Полипласт»), в количестве 1% от массы вяжущего. Кварцитопесчаник вводили взамен 20 и 50% портландцемента. Прочность при сжатии испытывали через 28 сут твердения образцов согласно ГОСТ 10180–2012. Результаты отражены в таблице 3.

Таблица 3
Влияние кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего
Источник: составлено авторами.

Table 3
The raw materials effect on the strength of the composite binder
Source: compiled by the author.

Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, м²/кг		Предел прочности при сжатии, МПа	
	Портландцемент	Кварцитопесчаник	Невыветренный кварцитопесчаник	Выветренный кварцитопесчаник
ЦКВП20	500	300	52,5	55,7
		500	54,9	57,7
		700	56,1	58,8
ЦКВП50	500	300	45,0	49,9
		500	46,5	50,2
		700	48,1	55,6

*ЦКВП20 (50) – замена цемента на 20 и 50 % кварцитопесчаником.

Максимальная прочность образцов 58,8 МПа достигнута в случае применения выветренного КВП с удельной поверхностью $S_{уд.} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$. Экспериментально подтверждена возможность снижения доли портландцемента на 20 и 50 % соответственно при замене его на кварцитопесчаник, при возможном увеличении прочности на 20 % в сравнении с составами на невыветренном КВП.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые в мировой практике доказана возможность использования кварцитопесчаников, затронутых процессами выветривания в качестве сырья для производства композиционного вяжущего. Установлено, что применение выветренного кварцитопесчаника в составе композиционных вяжущих позволяет существенно снизить долю цемента и энергоемкость процесса помола с возможностью увеличения прочности готового композита. Полученные коллективом авторов результаты исследований позволяют геологам осуществлять поиск, разведку и утверждение запасов нового сырья для строительной индустрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11–18.
2. Лесовик В. С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 286 с.
3. Kirthika S. K., Singh S. K., Chourasia A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete – A review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 268. 122089.
4. Лесовик В. С., Фомина Е. В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 10. С. 1241–1257.
5. Van Damme H. Concrete material science: Past, present, and future innovations // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. Pp. 5–24.
6. Gowram I., Beulah M. Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review // Materials Today: Proceedings. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.329.
7. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kozhukhova M., Promakhov V. The correlation of temperature-mineral phase transformation as a controlling factor of thermal and mechanical performance of fly ash-based alkali-activated binders // Materials. 2020. Vol. 13(22). pp. 1–12.

8. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements-A step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. pp. 22–33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.
9. Лесовик В. С., Федюк Р. С., Гридчин А. М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов // Строительные материалы. 2021. № 9. С. 32–40.
10. Fomina E. V., Lesovik V. S., Kozhukhova N. I., Chulenyov A. S. Role of Solutions when Metasomatic Transformations in Construction Composites // Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. pp. 168–174.
11. Lesovik V. S., Volodchenko A. A., Fisher H. B. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties // Journal of Southwest Jiaotong University. 2020. Vol. 55(3).
12. 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. 120440.
13. Lesovik R. V., Ageeva M. S., Matyukhina A. A., Fomina E. V. On the issue of designing structures of composite binders // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Т. 95. pp. 246–252.
14. Lesovik V. S., Glagolev E. S., Elistratkin M. Y., Pospelova M. A., Alfimova N. I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete // Materials Science Forum. 2021. Т. 1017. pp. 71–80.
15. Агеева М. С., Шаповалов С. М., Боцман Л. Н., Ищенко А. В. К вопросу использования промышленных отходов в производстве вяжущих веществ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 58–62.
16. Косолапов О. В., Душин А. В. Методический инструментальный обеспечения полноты использования невозобновимых ресурсов при экологически устойчивом недропользовании // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2 (50). С. 148–152.
17. Симанович И. М. Эпигенез и начальный метаморфизм Шокшинских кварцитопесчаников. Москва: Наука. 1966. 120 с.
18. McBride E. F. Quartz cement in sandstones: a review. Earth-Science Reviews. 1989. Vol. 26 (1–3). Pp. 69–112.
19. Симанович И. М. Литогенез кварцевых песчаных пород нижнего докембрия // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2013. Т. 88, № 5. С. 41–49.

REFERENCES

1. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. *Sovremennoe sostoyaniye i osnovnyye napravleniya razvitiya tekhnologii kompleksnoy pererabotki mineral'nogo syr'ya cvetnykh metallov* [Modern state and basic ways of technology development for complex processing of non-ferrous mineral raw materials]. *Cvetnye metally*. 2016; 11: 11–18 DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01 (In Russ.)

2. Lesovik V. S. *Geonika (geomimetika). Primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii*. [Geonics (geomimetics). Examples of realization in construction materials science]. Belgorod: BSTU. 2016. 287 p. (In Russ.)
3. Kirthika S. K., Singh S. K., Chourasia A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete – A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 268. 122089.
4. Lesovik V. S., Fomina E. V. *Novaya paradigma proektirovaniya stroitel'nykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka* [The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2019; 14(10): 1241-1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. (In Russ.)
5. Van Damme H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 5–24.
6. Gowram I., Beulah M. Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.329.
7. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kozhukhova M., Promakhov V. The correlation of temperature-mineral phase transformation as a controlling factor of thermal and mechanical performance of fly ash-based alkali-activated binders. *Materials*. 2020; Vol. 13(22): 1–12.
8. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements-A step towards sustainable building material and waste utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 178: 22–33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.
9. Lesovik V. S., Fediuk R. S., Gridchin A. M., Murali G. *Povyshenie ekspluatatsionnykh karakteristik zashchitnykh kompozitov* [Improving the operational characteristics of protective composites]. *Stroitel'nye Materialy*. 2021; 9: 32–40. (In Russ.)
10. Fomina E. V., Lesovik V. S., Kozhukhova N. I., Chulenyov A. S. Role of Solutions when Metasomatic Transformations in Construction Composites. *Materials Science Forum*. 2020; 974:168-174.
11. Lesovik V. S., Volodchenko A. A., Fisher H. B. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2020; 55(3).
12. 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.
13. Lesovik R. V., Ageeva M. S., Matyukhina A. A., Fomina E. V. On the issue of designing structures of composite binders. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 95:246–252.
14. Lesovik V. S., Glagolev E. S., Elistratkin M. Y., Pospelova M. A., Alfimova N. I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete. *Materials Science Forum*. 2021; 1017:71–80.
15. Ageeva M. S., Shapovalov S. M., Botsman A. N., Ischenko A. V. K voprosu ispol'zovaniya promyshlennykh othodov v proizvodstve vyazhushchih veshchestv [Revising the application of industrial wastes when binders production]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2017; 2:58-62. (In Russ.)
16. Kosolapov O. V., Dushin A. V. Metodicheskiy instrumentariy obespecheniya polnoty ispol'zovaniya nevozobnovimyykh resursov pri ekologicheski ustojchivom nedropol'zovanii [Methodological tools to ensure the completeness of thenon-renewable resources use in an environmentally sustainable subsoil use]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2018; 2 (50): 148–152. (In Russ.). DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-148-152
17. Simanovich I. M. *Epigenez i nachal'nyy metamorfizm Shokshinskiy kvarcitopeschanikov* [Epigenesis and initial metamorphism of Shokshinsky quartzite sandstones]. Moscow: The science.1966, pp:120. (In Russ.)
18. McBride E.F. Quartz cement in sandstones: a review. *Earth-Science Reviews*. 1989; 26 (1–3): 69–112.
19. Simanovich I. M. Litogenez kvarcevykh peschanykh porod nizhnego dokembriya [Lithogenesis of early precambrian quartz sand rocks]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otdel geologicheskij*. 2013; 5 (88): 41–49. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия в теоретические и экспериментальные разделы статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each author has made equal share to theoretical and experimental sections of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Фомина Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник.

Черепанова Ирина Александровна – аспирант.

Ряпухин Александр Николаевич – аспирант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. Lesovik – Dr.Sci.Tech., Professor, the Head of the Construction Materials, Products and Structures Department.

Ekaterina V. Fomina – Cand. of Sci., Assistant professor.

Irina A. Cherepanova – Graduate student.

Alexander N. Ryapukhin – Graduate student.

УДК 624.131.52

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

EDN: UBYHTO

Научная статья



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ В НАСЫПНОМ МАССИВЕ ИЗ ПЕСКА С УЧЁТОМ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. А. Лунёв*, Р. С. Кацарский

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Россияlunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>katsarroman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1540-1160>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Часть методов проектирования земляных сооружений и оснований базируется на решениях по прогнозированию напряжённого состояния грунтов под действием внешней нагрузки, которые не учитывают особенности структуры материала. Это вступает в противоречие с существующими исследованиями, которые указывают на то, что изменение влажности, плотности и формы частиц материала влекут изменения в механизме формирования напряжённого состояния. Согласно исследованиям при изменении вида грунта, влажности и плотности массива изменяются как его механические характеристики, так и напряжённое состояние, что требует учета при проектировании земляных сооружений и оснований зданий.

Материалы и методы. Для изучения напряжённого состояния, возникающего в песчаном грунте с различными механическими характеристиками, были проведены экспериментальные исследования по определению давлений в песке различной плотности и влажности под действием внешней нагрузки от круглого штампа площадью 500 см². Для этого на глубине 5, 15, 25, 40 см по оси круглого штампа в массиве песка средней крупности устанавливали месдозы, после чего измеряли давления при приложении нагрузки. Для каждого значения плотности и влажности, созданного в процессе эксперимента, определяли механические характеристики песчаного грунта.

Результаты. Анализ существующих зависимостей для прогнозирования максимальных главных напряжений показал, что решения Кандаурова и Фрелиха, единственные дающие связь формирования напряжённого состояния с механическими характеристиками и позволяющие прогнозировать минимальные главные напряжения. Было установлено влияние механических характеристик песчаного грунта (угла внутреннего трения и модуля упругости при разной плотности и влажности) на параметр Фрелиха и коэффициент распределительной способности среды решения Кандаурова.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил вывести зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений песчаного грунта в точках, расположенных на разной глубине, по оси нагруженного круглого штампа. Предложенные зависимости являются модификацией решений Кандаурова и Фрелиха, в которых учтена связь между механическими характеристиками песчаного грунта и параметрами распределяющей способности среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, грунты, механика грунтов, главные напряжения.

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ (грант для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4285.2022.4). Отдельную благодарность авторы выражают анонимным рецензентам, чья работа позволила существенно повысить качество статьи.

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Лунёв А. А., Кацарский Р. С., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лунёв А. А., Кацарский Р. С. Прогнозирование главных напряжений от внешней нагрузки в насыпном массиве из песка с учётом его механических характеристик // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 738-751. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

EDN: UBYHTO

PREDICTION OF PRINCIPAL STRESSES FROM EXTERNAL LOAD IN A SAND MASS CONSIDERING ITS MECHANICAL CHARACTERISTICS

Aleksandr A. Lunev*, Roman S. Katsarsky

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>

katsarroman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1540-1160>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. A part of the methods for designing earthworks and foundations is based on solutions for predicting the stress state of soils under the action of an external load, which do not take into account the structural features of the material. This is in conflict with current studies, which indicate that changes in the moisture content, density, and shape of material particles entail changes in the mechanism of stress state formation. According to some research, when the type of soil, moisture content and density of the mass change, both its mechanical characteristics and the stress state change, which requires consideration in the design of earthworks and building foundations.

The method of research. To study the stress state arising in sandy soil with different mechanical characteristics, experimental studies were carried out to determine the pressures in sand of different density and moisture under the action of an external load from a round stamp with an area of 500 cm². To do this, at a depth of 5, 15, 25, 40 cm along the axis of a round stamp in an array of sand of medium size, mesdoses were set, after which the pressures were measured when the load was applied. For each value of density and moisture created during the experiment, the mechanical characteristics of the sandy soil were determined.

Results. The analysis of the existing dependencies for predicting the maximum principal stresses showed that the Kandaurov and Frohlich's solutions are the only ones that give a connection between the formation of the stress state and mechanical characteristics and allow predicting the minimum principal stresses. The influence of the mechanical characteristics of sandy soil (the angle of internal friction and the modulus of elasticity at different density and humidity) on the Frohlich's parameter and the distribution capacity coefficient of the medium of the Kandaurov's solution was established.

Conclusion. The analysis of the results of experimental studies made it possible to derive dependencies for predicting the maximum principal stresses of sandy soil at points located at different depths along the axis of a loaded round stamp. The proposed dependencies are a modification of Kandaurov and Frohlich's solutions, which take into account the relationship between the mechanical characteristics of sandy soil and the parameters of the distribution capacity of the medium.

KEYWORDS: construction, highways, soil stabilisation, soils, principal stress.

ACKNOWLEDGMENTS: The work was supported financially by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (grant for state support of young Russian scientists - candidates of sciences MK-4285.2022.4). The authors are especially grateful to the anonymous reviewers, whose work has significantly improved the quality of the article.

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 11.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

© Lunev A. A., Katsarsky R. S., 2022



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

For citation: Lunev A. A., Katsarsky R. S. Prediction of principal stresses due to external load in sans mass considering its mechanical characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 738-751. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование напряжённого состояния требуется для решения множества задач проектирования, таких как проектирование рабочих органов сельскохозяйственной и строительной техники [1, 2], оценка устойчивости насыпей земляного полотна [3], прогноз осадок оснований и фундаментов, учёт трафика [4], анализ воздействия шин на рыхлые грунты [5, 6], проверка сдвигустойчивости дорожных одежд [7, 8] и др. При этом учитываются напряжения, возникающие за счёт нагрузки от собственного веса насыпи (статические нагрузки) и от подвижного состава (динамические нагрузки).

Часть методов проектирования базируется на классических решениях по прогнозированию напряжённого состояния грунтов под действием внешней нагрузки (Буссинеск, Фламан, Митчелл, Das и др.). Однако современные представления о формировании напряжённого состояния учитывают различия в структуре грунтов и состоянии массива на распределение напряжений. Исследования по нагружению фотоупругих элементов (Santamarina [9], Behringer [10], Clark [11], Takahashi [12]) показывают, что распределение напряжений зависит от формы частиц, степени упорядоченно-

сти элементов (аналог плотности) и характера приложения нагрузок (рисунок 1).

Грунты имеют разную форму частиц, следовательно, создают различную структуру при уплотнении [13, 14]. Исходя из этого положения, можно выдвинуть гипотезу о наличии особенностей в формировании напряжённого состояния каждого из видов грунтов и решающем влиянии степени уплотнения на этот механизм. Эта гипотеза частично подтверждена в результате исследований [15, 16].

Влияние влажности грунта на напряжённое состояние было отмечено в работе [17]. Этот факт был установлен авторами [17] во время эксперимента по нагружению массива из суглинка с 43,5% глинистых, 22,2% пылеватых и 34,3% песчаных частиц. Исследование [18] также показало влияние влажности и прочности покрытия на уровень контактных напряжений. Подтверждает влияние механических характеристик грунтов на распределение напряжений и работа [19], в которой на основе формулы В. А. Флорина проведено моделирование влияния угла внутреннего трения, сцепления, коэффициента бокового давления и пр. на вертикальные напряжения.

В связи с этим очевидно требуется модификация традиционно используемых в прак-

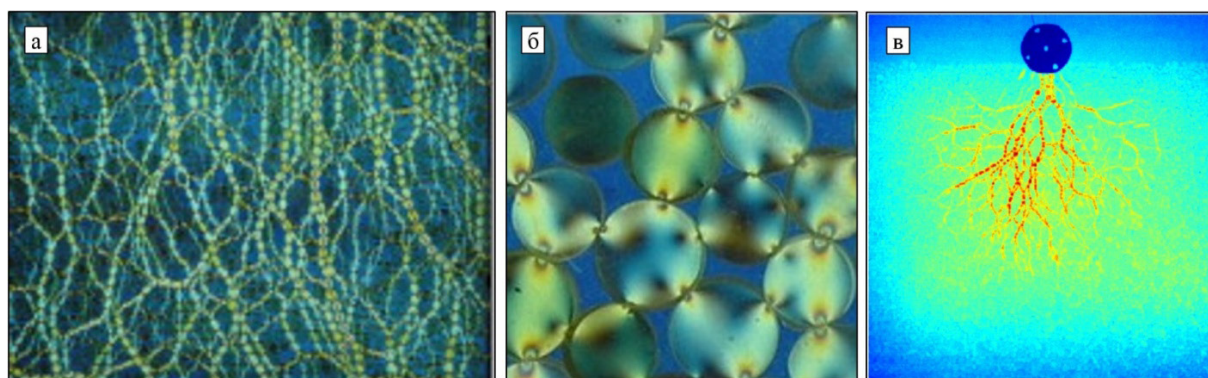


Рисунок 1 – Распределение напряжений в двумерном массиве из упорядоченных фотоупругих элементов:
а – цепочки напряжений, просматриваемые при равномерном нагружении массива;
б – свечение фотоупругих элементов в зоне концентрации напряжений;
в – цепочки напряжений, возникающие от действия колесной нагрузки
Источник: Электронный песчупс: <https://webhome.phy.duke.edu/~bob/>.

Figure 1 – Stress distribution in a two-dimensional array of differently ordered round elements: a - stress chains viewed under uniform loading of the array; b - glow of photoelastic elements in the particle contact zone (stress concentration); c - stress distribution under the action of the load emitting the wheel
Source: Available at: <https://webhome.phy.duke.edu/~bob/>.

тике проектирования зависимостей, не учитывая происхождения грунтов, их состояние и особенности приложения нагрузки. Поэтому целью исследования является подбор зависимости для прогнозирования напряжённого состояния в насыпном массиве песка средней крупности, учитывающей его механические характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Теоретическая основа

Для достижения поставленной цели нами были проанализированы потенциально пригодные зависимости для прогнозирования напряженного состояния (максимальных главных напряжений) в грунтах с разным генезисом, формой частиц и крупностью (таблица 1).

Таблица 1

Формулы для прогнозирования максимальных главных напряжений в кПа

Источник: составлено авторами.

Table 1

Formulas for predicting maximum principal stresses in kPa

Source: compiled by the authors.

Авторы	Зависимость	Авторы	Зависимость
L. V. Boussinesq [16, 20]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{-1,5} \right] \quad (1)$	G. L. Klein [20]	$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg} f(\varphi) \right)^{-2} \quad (2)$
M. Harr [20]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-4R^2 \nu_p}{z^2} \right) \right] \quad (3)$	И. И. Кандауров [16]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-R^2}{2z^2 \lambda} \right) \right] \quad (4)$
В. Г. Пискунов, Н. Н. Иванов С. А. Матвеев, Н. Н. Литвинов, Р. Е. Петров [16]	$\sigma_z = B \cdot \exp(-\gamma z) \quad (5)$ $\sigma_z = 2p \cdot [\exp(\lambda \{1 - \gamma' z\})]^{(1-\lambda)} \quad (6)$	О. К. Фрелих [7,21]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2} \right)^n} \right] \quad (7)$
М. И. Якунин [22]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 + a \cdot \left(\frac{z}{D} \cdot \sqrt{\frac{E_{сч}}{E_{осн}}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (8)$	А. С. Александров [22]	$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg}(\beta_\phi \cdot \varphi) \right)^{-2} \quad (9)$
Формулы для определения коэффициентов бокового давления в решении Кандаурова и коэффициента, характеризующего распределение напряжений в среде по решению M. Harr [20]: $\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}; \quad (10) \quad ; \quad \nu_p = \frac{1}{8 \cdot \lambda}; \quad (11)$		Формулы С. R. Gonzalez [21, 23] Air Force and Navy для определения параметра Фрелиха, характеризующего распределительную способность среды: $n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.337} \quad ; \quad (12); \quad n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.1912} \quad (13)$	
Примечание: p – среднее давление по поверхности круглого нагруженного штампа, МПа; z – глубина точки, в которой определяются напряжения относительно середины штампа, м; R – радиус штампа, м; λ – коэффициент бокового давления; ν _p – коэффициент распределительной способности среды для решения Harr; γ – коэффициент затухания напряжений; n – параметр Фрелиха; D _o – диаметр штампа, м; f(φ) – неизвестная функция угла внутреннего трения, °, μ – коэффициент Пуассона, CBR – калифорнийское число несущей способности, %; a – коэффициент концентрации напряжений, принимаемый 1,0 для нежестких дорожных одежд и 2,5 для упругих изотропных тел; показатель степени радикала, принимаемый 2,5 или 3,0; E _{сч} и E _{осн} – модули упругости материала слоя и основания, МПа; βφ – параметр, определяющий долю угла рассеивания от угла внутреннего трения.			

Из таблицы 1 видно, что прогнозирование напряжённого состояния, возникающего в грунтах под действием внешних нагрузок, обычно основывается на решениях механики сплошной или зернистой среды, а также инженерных аппроксимациях. Во всех случаях, кроме решения Буссинеска, учитываются особенности структуры материала. Для этой цели используются параметры материала: коэффициент распределительной способности среды [16], параметр Фрелиха [21, 23, 24], угол внутреннего трения [24], модуль упругости, коэффициент бокового давления [25, 26] и др.

Коэффициент бокового давления рядом авторов предлагается вычислять через угол внутреннего трения φ или коэффициент Пуассона. Зависимости для определения коэффициента бокового давления через угол внутреннего трения представлены в таблице 2. А при известном коэффициенте Пуассона можно получить коэффициент бокового давления через зависимость (10). Кроме того, известны и собственные решения по определению коэффициента распределительной среды, так решение Баданина и соавторов приведено в таблице 2 [27, 28, 29, 30, 31, 31].

Представленные формулы позволяют определить коэффициент распределительной способности среды исходя из параметров материала, но в источниках нет данных о применимости того или иного решения для всего

разнообразия грунтов (например, для золошлаковой смеси).

2.2. Определение давлений по глубине массива

Для изучения формирования напряжённого состояния в песчаном грунте с различными механическими характеристиками (при разной плотности и влажности) были проведены экспериментальные исследования по определению давлений, возникающих в песчаном грунте под действием внешней нагрузки.

Для определения давлений были использованы месдозы ТДДГ-0,5, установленные внутри массива песчаного грунта на глубине 5, 15, 25, 40 см от поверхности. Контроль положения датчиков в плане велся с помощью системы отвесов, а высотное положение велось с помощью нивелира (рисунок 2, а), а горизонтальность положения обеспечивалась двухосевым уровнем. Нагружение осуществлялось посредством круглого жесткого штампа площадью 500 см² с помощью гидравлического цилиндра до возникновения среднего давления по подошве штампа 50 кПа. Контроль силового воздействия велся с использованием электронного динамометра ДЭП/3-1Д-50С-2. Проведение испытаний показано на рисунке 2, б. В рамках серии экспериментов планировалось устраивать массив сухого песка, который дважды последовательно увлажнялся водопроводной водой.

Таблица 2
Формулы для определения коэффициентов распределительной способности среды, связанные с углом внутреннего трения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Formulas for determining the coefficients of the distribution capacity of the medium associated with the angle of internal friction
Source: compiled by the authors.

Авторы	Формула для определения коэффициента бокового давления (распределительной способности среды Кандаурова)		
Ж. Биарез и соавт.	$\lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (14)$	Р. Я. Попильский и соавт.	$\lambda = \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right] \quad (17)$
M.D. Bolton	$\lambda = \frac{1 - \sin(\varphi - 11,5)}{1 + \sin(\varphi - 11,5)} \quad (15)$	Mayne-Kulhaway	$\lambda = 1 - 0,998 \sin \varphi \quad (18)$
Brooker-Ireland	$\lambda = 0,95 - \sin \varphi \quad (16)$	Г. И. Покровский	$\lambda = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi \quad (19)$
Формула для определения коэффициента распределительной способности среды Нарт			
Баданин и соавт.		$\nu_p = \operatorname{ctg}(\varphi + 45^\circ) \quad (20)$	



Рисунок 2 – Проведение экспериментальных исследований:
а – контроль положения месдоз; б – загрузка массива в ходе эксперимента
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Conducting experimental studies:
a - control of the position of sensors; b – array loading during the experiment
Source: compiled by the authors.

Следует отметить, что при увлажнении массива отмечалось его уплотнение за счёт фильтрации воды с мелкими частицами, что не позволило подготовить массив равной плотности с изменяемой влажностью (плотность массива контролировалась методом режущего кольца, а влажность методом высушивания проб до постоянной массы согласно ГОСТ 5180–2015).

Анализ пригодности решений, приведенных в таблице 1, для описания результатов проведенных исследований выполнялся в электронном виде с использованием программного комплекса Mathcad.

2.3. Определение механических характеристик песка

Отбор проб песка для исследований был выполнен в Омском речном порту в месте погрузки составов. Сушка песка производилась при температуре 105 °С, в сушильном шкафу с циркуляцией воздуха. Хранение проб выполнялось в герметичных контейнерах из полипропилена, при комнатной температуре и влажности не выше 80%.

Для изучения степени изменения свойств исследуемых грунтов были проведены эксперименты по определению зернового состава по ГОСТ 12536–2014, максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности при стандартном уплотнении по ГОСТ 22733–2016, а также истинной плотности по ГОСТ 5180–2015.

Для значений плотности и влажности, получаемых в ходе экспериментальных исследова-

ний, описанных в п. 2.2, определялось удельное сцепление и угол внутреннего трения по ГОСТ 12248.1–2020 и модуль деформации по ГОСТ 12248.4–2020.

РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Анализ представленных решений

Анализ решений, приведенных в таблице 1, показывает, что все предложенные зависимости (кроме решений Буссинеска) учитывают особенности механизма формирования напряжённого состояния в грунтах различной структуры. Решение Клейна (2) связано с углом внутреннего трения неизвестной функцией, что говорит о влиянии влажности и плотности грунта на механизм распределения напряжений под действием внешней нагрузки. Однако это влияние было исследовано в работе [15] и не нашло подтверждения. Решение (9), предложенное А. С. Александровым в работе [22], является модификацией предложенного Клейном (2) и также не описывает экспериментальное распределение давлений при статическом значении параметра (β_ϕ).

Решение Пискунова и пр. (5), а также их модификация Матвеевым и пр. (6) является инженерной аппроксимацией, которая теоретически пригодна для прогнозирования напряженного состояния в грунтовых средах. Однако эти решения требуют определения специфических параметров γ и γ_s с применением опытных установок и не могут быть использованы для прогнозирования напряженного состояния

без связи с механическими характеристиками грунтов. Кроме того, затухание напряжений в этих решениях является слишком интенсивным и не учитывает особенностей концентрации напряжений под штампом.

Решение Фрелиха, приведенное в (7), является более поздней модификацией решения Буссинеска и имеет в себе параметр, зависящий от распределяющей способности среды. Как и в решение Пискунова и пр., Матвеева и пр. его определение требует сложных геотехнических экспериментальных исследований. Однако имеются зависимости, предложенные Gonzalez, позволяющие определить значения параметра Фрелиха через калифорнийское число несущей способности. Учитывая тот факт, что CBR связан с модулем упругости прямыми зависимостями [32, 33, 34], необходимо изучить связь параметра Фрелиха и модуля упругости (модуль деформации по второй ступени нагружения).

В механике зернистой среды изначально учитывалась разница во взаимодействии частиц посредством коэффициента распределительной среды (Кандауров). Априори мы считаем, что закономерности механики зернистых сред могут быть применимы к золошлаковой смеси (ЗШС) и пескам, поскольку форма и особенности контактной передачи давлений между частицами в ЗШС и в песках сходны. Применимость их к глинистым грунтам может быть сомнительна. Кроме того, как и в случае с теорией сплошных сред нет чёткого представления о значениях коэффициента распре-

делительной среды различных видов грунтов.

Учитывая тот факт, что решение Кандаурова и Нагг напрямую связаны между собой, в дальнейшем их следует рассматривать как единое решение. Решение Буссинеска (1) очевидно не удовлетворяет настоящему механизму формирования напряженного состояния, как и решение Клейна, которое является упрощенной аппроксимацией наряду с решениями Пискунова и Матвеева и непригодны для прогнозирования минимальных главных напряжений. Решение, предложенное Якуниным (8), при рассмотрении изотропного массива без подстилающего слоя в зоне распределения напряжений упрощается и также не может быть использовано для расчетов.

По этим причинам для оценки результатов прогнозирования стоит рассматривать только решения Фрелиха и Кандаурова, как единственные дающие связь формирования напряженного состояния с механическими характеристиками и позволяющие прогнозировать минимальные главные напряжения.

3.2. Результаты экспериментов по оценке давлений в массиве песка

Определение давлений по глубине массива песчаного грунта показало существенное изменение напряженного состояния под действием внешней нагрузки при различной влажности и плотности массива. Увеличение влажности и плотности насыпного массива в условиях эксперимента вело к существенному снижению уровня напряжений в точках по оси штампа (рисунок 3).

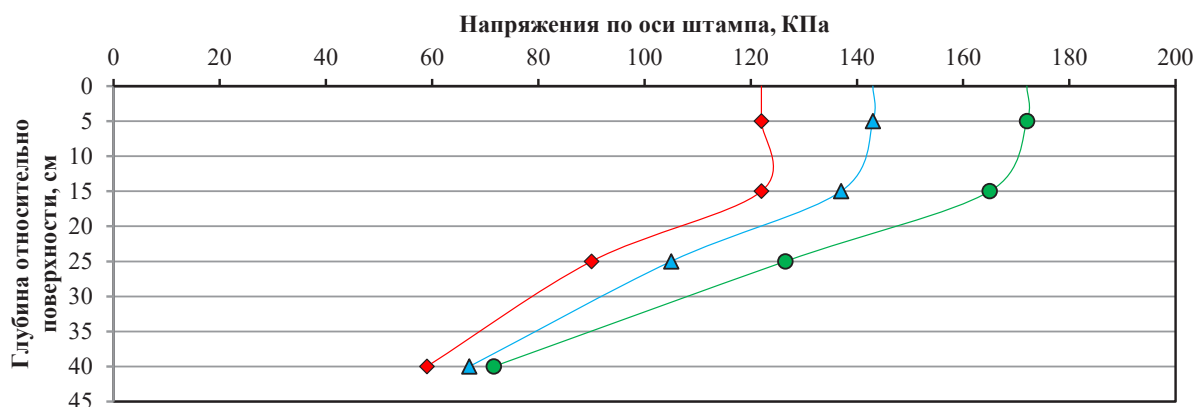


Рисунок 3 – Распределение давлений в массиве песка различной влажности под действием внешней нагрузки от круглого штампа в рамках первой серии испытаний: ● – сухой массив песка; ▲ – массив песка влажностью 2,5%; ◆ – массив песка влажностью 3,2%
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of pressures in a sand mass of different moisture content under the action of an external load from a round stamp in the first series of tests: ● – dry sand mass; ▲ – an array of sand with a moisture content of 2.5%; ◆ – an array of sand with a moisture content of 3.2%
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Характеристики исследуемого материала в различных условиях
Источник: составлено авторами.

Table 3
Characteristics of the test material under different conditions
Source: compiled by the authors.

№	Характеристики состояния массива	Параметры распределения давлений			Механические характеристики материала слоя		
		n	v	P0	φ	c	E
1	$K_y=0,90$; $w=0,3\%$	6,91	0,091	172	33,0	0	18,0
2	$K_y=0,94$; $w=2,5\%$	6,65	0,078	143	41,4	9	22,7
3	$K_y=0,99$; $w=3,2\%$	6,41	0,074	122	44,0	11	28,6
R^2		0,99	0,99	-	-	-	-

Кроме того, состояние массива оказало существенное влияние на контактные напряжения под подошвой штампа, которые для более сухого грунта с низкой плотностью показывают давления на 40% больше, что вероятно связано с большей концентрацией напряжений.

Структура массива оказывает влияние на интенсивность затухания давлений по глубине (распределительную способность среды). В таблице 3 приведены характеристики массива и результаты вычисления коэффициента распределительной способности среды по решению Кандаурова и параметра Фрелиха, а также уровень напряжений в зоне под штампом при нагружении, соответствующем распределенному давлению на штамп в 50 кПа.

3.3. Результаты определения характеристик песчаного грунта

Для исследований использовался песок средней крупности с модулем крупности 2,43. Оптимальная влажность, полученная в ходе испытаний, составила 7,5%, а максимальная плотность сухого грунта 1,87 г/см³ при плотности частиц грунта 2,61 г/см³.

Механические характеристики песчаного грунта, полученные в лаборатории, приведены в таблице 3.

Статистическая оценка и подбор параметров распределения давлений велся в программном комплексе Mathcad.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разница в напряжениях в зоне непосредственно под осью штампа сопоставима с представленной в [38] и вероятно вызвана концен-

трацией напряжений. Следует отметить, что, учитывая различия в контактных напряжениях, в дальнейшем требуется подробный анализ работ [35, 36], которые описывают особенности формирования давлений по поверхности штампа.

На данном этапе исследований рассматривалась только связь механических характеристик с затуханием напряжений по глубине массива. Поэтому для обработки данных значения давлений на глубине 5 см приравнивались к максимальным давлениям по поверхности штампа (на основе анализа зависимостей на рисунке 2).

Поскольку для прогнозирования напряжённого состояния решено рассматривать только решения Фрелиха и Кандаурова, сравнение было между равномерным распределением давлений и параболической схемой, предложенной Фарбером. Это связано с тем, что получаемая в работах [2, 5, 37] форма эпюр напряжений под штампом в целом соответствует предложенной параболической схеме, а в работе [15] соответствовала равномерной нагрузке. Для равномерной нагрузки результаты сопоставлялись с прогнозируемыми по формулам (4) и (7), в то время как для схемы Фарбера, приведённый ниже (21), использовались решения Радовского и Олсона, приведённые в таблице 4.

$$p(r) = 2 \cdot p \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (21)$$

где r – расстояние от оси до края штампа.

Таблица 4
Формулы для прогнозирования главных напряжений в кПа
Источник: составлено авторами.

Table 4
Formulas for predicting principal stresses in kPa
Source: compiled by the authors.

Авторы	Зависимость
Решение Б. С. Радовского для параболической нагрузки по схеме Фарбера на основе (4) [16]	$\sigma_z = 2p \cdot \left[1 - \frac{2\lambda z^2}{R^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-R^2}{2z^2\lambda}\right) \right) \right] \quad (22)$
Решение Р. Олсона для параболической нагрузки по схеме Фарбера на основе (7)	$\sigma_z = 2p \cdot \left[1 + \frac{2}{2-n} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^2 - \frac{2}{2-n} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^n \cdot \left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{\frac{2-n}{n}} \right] \quad (23)$

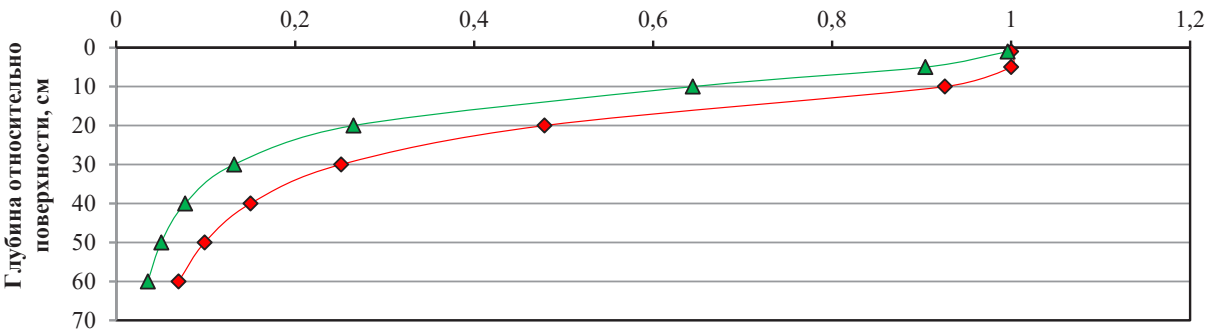


Рисунок 4 – Распределение давлений по решениям Кандаурова и Радовского при коэффициенте бокового давления, равного 0,3: ◆ – решение Кандаурова; ▲ – решение Радовского
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Pressure distribution in according to Kandaurov and Radovsky's solutions with a lateral pressure coefficient equal to 0.3: ◆ – Kandaurov's solution; ▲ – Radovsky's solution
Source: compiled by the authors.

Расчеты показали, что параболическое распределение недостаточно точно описывает результаты экспериментальных исследований (значение R² варьировалось от 0,63 до 0,65). Поэтому предлагаемые Радовским и Олсоном зависимости для прогнозирования напряженного состояния (см. таблицу 4) оказались непригодны для описания напряженного состояния.

Полученные экспериментальные данные лучше описываются решениями, предложенными для равномерного распределения контактных давлений (без учета значений контактных напряжений), поскольку ближе аппроксимируют опытные данные, чем решения Радовского (22) и Олсона (23). Для примера на рисунке 4 приведены графики, характеризующие затухание напряжений по глубине по решению Радовского для параболической

эпюры нагрузки и решению Кандаурова для круглого штампа с равномерно распределенной нагрузкой.

Хотя решение Кандаурова оказалось пригодным для описания экспериментальных данных, ни одна из формул, приведенных в таблице 2, непригодна для прогнозирования коэффициента бокового давления в песчаном грунте. Поскольку параметр распределительной способности среды имеет сильную корреляцию с углом внутреннего трения, была предложена собственная эмпирическая зависимость, позволяющая связать коэффициент распределительной способности среды и угол внутреннего трения. В результате чего была предложена зависимость для прогнозирования максимальных главных напряжений в песчаном грунте, которая приведена в таблице 5.

Таблица 5
Формулы для прогнозирования главных напряжений в кПа
Источник: составлено авторами.

Table 5
Formulas for predicting principal stresses in kPa
Source: compiled by the authors.

Наименование полученного решения	Зависимость
Решение с эмпирическими зависимостями на основе решения (4) механики зернистой среды	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-R^2}{2z^2 (1,084 \cdot \varphi^{-0,708})} \right) \right] \quad (24)$
Решение с эмпирическими зависимостями на основе решения (7) механики сплошной среды	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2} \right)^{-(34,91 \cdot E^{-0,621})} \right] \quad (25)$

Влажность и плотность массива оказывают влияние на контактные напряжения под штампом, что требует учета несущей способности материала слоя посредством модуля упругости (модуль деформации в компрессионном приборе по второй ветви нагружения) и дополнительных исследований. Причем установлено, что решение Радовского и Олсона при использовании параболической схемы приложения давлений, предложенной Фарбером, хуже описывает результаты экспериментов.

Наличие корреляции между параметром модуля упругости и параметром Фрелиха показывает, что для прогнозирования напряжений подходит решение Фрелиха, модифицированное корреляцией между n и E , что приведено в таблице 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение давлений по глубине массива песчаного грунта показало, что увеличение влажности и плотности насыпного массива в условиях эксперимента вело к существенному снижению уровня напряжений в точках по оси штампа.

Было установлено, что влажность и плотность массива оказывают влияние на контактные напряжения под штампом, что требует учета несущей способности материала слоя посредством модуля упругости (модуль деформации в компрессионном приборе по второй ветви нагружения) и дополнительных исследований.

Расчеты показали, что параболическое распределение недостаточно точно описывает результаты экспериментальных иссле-

дований (значение R^2 варьировалось от 0,63 до 0,65). Было установлено, что полученные экспериментальные данные лучше описываются решениями, предложенными для равномерного распределения контактных давлений (без учета значений контактных напряжений), поскольку ближе аппроксимируют опытные данные (значение R^2 варьировалось от 0,98 до 0,99), чем решения, выведенные Радовским и Олсоном.

Было установлено влияние механических характеристик песчаного грунта (угла внутреннего трения и модуля упругости при разной плотности и влажности) на параметр Фрелиха и коэффициент распределительной способности среды решения Кандаурова. На основе полученных корреляций, решений Фрелиха и Кандаурова были выведены зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений песчаного грунта в точках, расположенных на разной глубине, по оси нагруженного круглого штампа.

Полученные зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений требуют проведения дополнительных исследований на грунтах различного происхождения для проверки их пригодности для других разновидностей грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kešner A. et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment // Biosyst. Eng. 2021. Vol. 209. Pp. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012>

2. Lamandé M., Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load // *Soil Tillage Res.* 2011. Vol. 114, Issue. 2. Pp. 71–77. DOI:10.1016/j.still.2010.10.001
3. Sinha A. K. et al. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT // 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2009. P. Paper No. 3-49.
4. Augustin K. et al. FiTraM: A model for automated spatial analyses of wheel load, soil stress and wheel pass frequency at field scale // *Biosyst. Eng.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 180. Pp. 108–120. DOI:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.019
5. Higa S. et al. Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2015. Vol. 62. Pp. 63–73. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001
6. Higa S., Nagaoka K., Yoshida K. Stress distributions of a grouser wheel on loose soil // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2019. Vol. 85. Pp. 15–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.07.001
7. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A. L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 2. Modified models to calculate the principal and shear stresses // *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 62, № 2. Pp. 51–68. DOI: 10.5862/MCE.62.6
8. Александров А. С. Анализ методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте // *Вестник СибАДИ*. 2021. № 5. С. 576–613. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613
9. Santamarina J. C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces // *Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction*, in honor of Charles C. Ladd. MIT, 2001. Pp. 1–32. DOI: https://doi.org/10.1061/40659(2003)2
10. Behringer R. P. Jamming in granular materials // *Comptes Rendus Phys.* Elsevier Masson SAS, 2015. Vol. 16, № 1. P. 10–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.02.001
11. Clark A. H., Petersen A. J., Kondic L., Behringer R. P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // *Phys. Rev. Lett.* 2015. Vol. 114 No. 144502. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502
12. Takahashi T. et al. Granular response to impact: Topology of the force networks // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 2018. Vol. 97, № 1. Pp. 012906. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012906
13. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2009. Pp. 763–778.
14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. Pp. 914–924. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)
15. Lunev A. A., Sirotuk V. V. Stress distribution in ash and slag mixtures // *Mag. Civ. Eng.* 2019. Vol. 86, № 2. Pp. 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7
16. Матвеев С. А., Литвинов Н. Н., Петров Р. Закономерности распределения напряжений в грунтовых основаниях внутрихозяйственных автомобильных дорог // *Вестник Омского ГАУ*. 2017. № 4(28). С. 233–239.
17. Gheshlaghi F., Mardani A. Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2021. Vol. 95. Pp. 7–14. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.02.004
18. Nguyen V. N. et al. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2008. Vol. 45, № 1–2. Pp. 25–44. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.03.005
19. Kondratieva L. N., Popov V. M., Medvedsky P. Y. Methods of calculation of soil stress-strain distribution in sheet pile corset // *Procedia Struct. Integr.* Elsevier B. V., 2017. Vol. 6. Pp. 101–108. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.016
20. Александров А. С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч. 1. Состояние вопроса: монография. 2015. Ч. 1. 292 с.
21. Bianchini A. Fröhlich theory-based approach for analysis of stress distribution in a layered system: Case study // *Transp. Res. Rec. National Research Council*, 2014. Vol. 2462. Pp. 61–67. DOI:10.3141/2462-08
22. Александров А. С., Александрова Н. П., Долгих Г. В. Модифицированные модели для расчета главных напряжений в дорожных конструкциях из дискретных материалов // *Строительные материалы*. ООО Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы», 2012. № 10. С. 14–17.
23. Gonzalez C. R., Barker W. R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports // *Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering*. 2006. Pp. 1–10.
24. Aleksandrov A. S., Kalinin A. L., Tsyguleva M. V. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics // *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 66, № 6. Pp. 35–48. DOI: 10.5862/MCE.66.4
25. Beakawi Al-Hashemi H. M., Baghabra Al-Amoudi O. S. A review on the angle of repose of granular materials // *Powder Technology. Elsevier B. V.*, 2018. Vol. 330. Pp. 397–417. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003
26. Moshenzhal A. V. Account of Irregularity in the Stress Distribution along Wood and Concrete Sleepers from a Perspective of Granular Media Mechanics // *Procedia Engineering. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 189. Pp. 637–642. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.101
27. Lee J. et al. Assessment of K₀ correlation to strength for granular materials // *Soils Found. Japanese Geotechnical Society*, 2013. Vol. 53, № 4. Pp. 584–595. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.009

28. Federico A., Elia G., Murianni A. The at-rest earth pressure coefficient prediction using simple elasto-plastic constitutive models // *Comput. Geotech.* 2009. Vol. 36, No. 1–2. Pp. 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.01.006>

29. Brooker E. W., Ireland H. O. Earth Pressures at Rest Related to Stress History // *Can. Geotech. J.* NRC Research Press Ottawa, Canada, 1965. Vol. 2, № 1. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1139/t65-001>

30. Mayne P. W., Kulhawy F.H. K-OCR relationships in soil // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1983. Vol. 20, № 1. Pp. A2. DOI:10.1061/AJGEB6.0001306

31. Badanin A. N., Bugrov A.K., Krotov A.V. The determination of the first critical load on particulate medium of sandy loam foundation // *Mag. Civ. Eng. Saint Petersburg State Polytechnical University*, 2012. Vol. 35, № 9. Pp. 29–34. DOI: 10.5862/MCE.35.4

32. Семенова Т. В., Долгих Г. В., Полугородник Б. Н. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетromетра для оценки качества уплотнения грунта // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 1. С. 59–66.

33. Putri E. E., Kameswara Rao V. N.S., Manan M. A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test // *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. Vol. 2, № 1. Pp. 34–40. doi:10.5923/j.jce.20120201.05

34. Guide for Mechanistic-Empirical Design OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES FINAL DOCUMENT APPENDIX CC-1: CORRELATION OF CBR VALUES WITH SOIL INDEX PROPERTIES NCHRP. Illinois, 2001.

35. Schjønning P. et al. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface // *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99, № 1. Pp. 119–133. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005

36. Schjønning P. et al. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics // *Soil Tillage Res.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 152. Pp. 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>

37. Arvidsson J., Keller T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure // *Soil Tillage Res.* 2007. Vol. 96, № 1–2. Pp. 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.012>

38. Abu-Hamdeh N. H., Reeder R.C. Measuring and predicting Stress Distribution under Tractive Devices in Undisturbed Soils // *Biosyst. Eng. Academic Press*, 2003. Vol. 85, № 4. Pp. 493–502. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00069-2)

REFERENCES

1. Kešner A. et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment. *Biosyst. Eng.* 2021. Vol. 209. Pp. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012>

2. Lamandé M., Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil Tillage*

Res. 2011. Vol. 114, № 2. Pp. 71–77. DOI:10.1016/j.still.2010.10.001

3. Sinha A.K. et al. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2009. P. Paper No. 3-49.

4. Augustin K. et al. FiTraM: A model for automated spatial analyses of wheel load, soil stress and wheel pass frequency at field scale. *Biosyst. Eng.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 180. Pp. 108–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.019>

5. Higa S. et al. Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil. *J. Terramechanics.* ISTVS, 2015. Vol. 62. Pp. 63–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001>

6. Higa S., Nagaoka K., Yoshida K. Stress distributions of a grouser wheel on loose soil. *J. Terramechanics.* ISTVS, 2019. Vol. 85. Pp. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.07.001>

7. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A.L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 2. *Modified models to calculate the principal and shear stresses.* *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 62, № 2. Pp. 51–68. DOI: 10.5862/MCE.62.6

8. Aleksandrov A. S. Analiz metodov rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniyu sdvigu v grunte [Analysis of methods of calculating road structures based by shear resistance in the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021. Vol. 18. Pp. 576-613. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613> (In Russ.)

9. Santamarina J. C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces. *Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd.* MIT, 2001. Pp. 1–32. DOI: [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2)

10. Behringer R. P. Jamming in granular materials. *Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS*, 2015. Vol. 16, № 1. Pp. 10–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.02.001>

11. Clark A. H., Petersen A. J., Kondic L., Behringer R. P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. *Phys. Rev. Lett.* 2015. Vol. 114 No. 144502. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502>

12. Takahashi T. et al. Granular response to impact: Topology of the force networks. *Phys. Rev. E. American Physical Society*. 2018. Vol. 97, № 1. Pp. 012906. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012906>

13. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes. Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE). 2009. Pp. 763–778.

14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. P. 914–924. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914))

15. Lunev A. A., Sirotuk V. V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Mag. Civ. Eng.* 2019. Vol. 86, № 2. Pp. 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7

16. Matveev S. A., Litvinov, N. N., Petrov, R. E. Zakonomernosti raspredeleniya napryazhenij v gruntovyh osnovaniyah vnutrihozyajstvennyh avtomobil'nyh dorog [Regularities of tension distribution in the intereconomic highways soil base]. *Vestnik Omskogo GAU*. Vol. 28. No. 4. 2017. Pp. 233-239. (In Russ.)
17. Gheshlaghi F., Mardani A. Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics. *J. Terramechanics. ISTVS*, 2021. Vol. 95. Pp. 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.02.004>
18. Nguyen V. N. et al. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *J. Terramechanics. ISTVS*, 2008. Vol. 45, № 1-2. Pp. 25-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.03.005>
19. Kondratieva L. N., Popov V. M., Medvedsky P. Y. Methods of calculation of soil stress-strain distribution in sheet pile corset. *Procedia Struct. Integr.* Elsevier B.V., 2017. Vol. 6. Pp. 101-108. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.016
20. Aleksandrov A. S. *Sovershenstvovanie rascheta dorozhnyh konstrukcij po soprotivleniyu sdvigu. CH 1. Sostoyanie voprosa* [Improving the calculation of road structures for shear resistance. P 1. State of issue]: Monograph. 2015. Vol. 1. 291 p. (In Russ.)
21. Bianchini A. Fröhlich theory-based approach for analysis of stress distribution in a layered system: Case study. *Transp. Res. Rec. National Research Council*, 2014. Vol. 2462. Pp. 61-67. DOI:10.3141/2462-08
22. Aleksandrov A. S., Aleksandrova N.P., Dolgih G.V. Modificirovannye modeli dlya rascheta glavnyh napryazhenij v dorozhnyh konstrukciyah iz diskretnykh materialov [Modified models for calculation of principal stresses in road structures made of discrete materials]. *Construction Materials. LLC Advertising and publishing company "Stroymaterialy"*. 2012. Vol. 10. Pp. 14-17. (In Russ.)
23. Gonzalez C.R., Barker W.R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports. Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering. 2006. Pp. 1-10.
24. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L., Tsyguleva M. V. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics. *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 66, № 6. Pp. 35-48. DOI: 10.5862/MCE.66.4
25. Beakawi Al-Hashemi H.M., Baghabra Al-Amoudi O.S. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology. Elsevier B.V.*, 2018. Vol. 330. Pp. 397-417. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003>
26. Moshenzhal A. V. Account of Irregularity in the Stress Distribution along Wood and Concrete Sleepers from a Perspective of Granular Media Mechanics. *Procedia Engineering. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 189. Pp. 637-642. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.101>
27. Lee J. et al. Assessment of K0 correlation to strength for granular materials. *Soils Found. Japanese Geotechnical Society*. 2013. Vol. 53, № 4. Pp. 584-595. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.009>
28. Federico A., Elia G., Murianni A. The at-rest earth pressure coefficient prediction using simple elastoplastic constitutive models. *Comput. Geotech.* 2009. Vol. 36, № 1-2. Pp. 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.01.006>
29. Brooker E. W., Ireland H. O. Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Can. Geotech. J. NRC Research Press Ottawa, Canada*. 1965. Vol. 2, № 1. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1139/t65-001>
30. Mayne P. W., Kulhaw F. H. K-OCR relationships in soil. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1983. Vol. 20, № 1. Pp. A2. DOI:10.1061/AJGEB6.0001306
31. Badanin A. N., Bugrov A. K., Krotov A. V. The determination of the first critical load on particulate medium of sandy loam foundation. *Mag. Civ. Eng. Saint Petersburg State Polytechnical University*. 2012. Vol. 35, № 9. Pp. 29-34. DOI: 10.5862/MCE.35.4
32. Semenova T. V., Dolgih G. V., Polugorodnik B. N. Primenenie kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki kachestva uplotneniya grunta [California application number of carrying capacity and dynamic cone penetrometry to assess the quality of compacted soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. Vol. 1. Pp. 59-66. (In Russ.)
33. Putri E. E., Kameswara Rao V. N. S., Manan M. A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test. *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. Vol. 2, № 1. Pp. 34-40. doi:10.5923/j.jce.20120201.05
34. Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures final document appendix CC-1: correlation of cbr values with soil index properties NCHRP. Illinois, 2001.
35. Schjønning P. et al. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99, № 1. Pp. 119-133. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005
36. Schjønning P. et al. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil Tillage Res. Elsevier B.V.*, 2015. Vol. 152. Pp. 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>
37. Arvidsson J., Keller T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil Tillage Res.* 2007. Vol. 96, № 1-2. Pp. 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.012>
38. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C. Measuring and predicting Stress Distribution under Tractive Devices in Undisturbed Soils. *Biosyst. Eng. Academic Press*, 2003. Vol. 85, № 4. Pp. 493-502. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00069-2)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

COAUTHOR' CONTRIBUTION

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук; директор центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли.

Кацарский Роман Сергеевич – магистрант; заведующий лабораторией центра компетенций

в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr A. Lunev — Cand. of Sci., the Head of the Competence centre for the use of recycled material resources in construction industry.

Roman S. Katsarskiy – Master's student, the Head of the laboratory in the Competence centre for the use of recycled material resources in construction industry.

УДК 691.328
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
EDN: SPRCLI
Научная статья



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Ю. В. Пухаренко^{1, 2}, Д. А. Пантелеев², М. И. Жаворонков^{2*}

¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия

tsik54@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>,
dm-pant@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>,
sith07@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4056-5965>

*ответственный автор

*corresponding author

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования являлась оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости.

Материалы и методы. При проведении исследований применены методы испытаний, регламентируемые положениями национальных стандартов, применялось оборудование, специально разработанное для проведения настоящего исследования.

Результаты. Представлены результаты испытаний фибробетонов, изготовленных с применением низко модульных и высоко модульных волокон.

Обсуждение и заключение. В результате анализа приведенных данных показано, что для оценки эффективности и правильного выбора армирующих волокон недостаточно характеризовать фибробетон только прочностью на растяжение при изгибе. Для более точной оценки предлагается использовать характеристики трещиностойкости, например, критический коэффициент интенсивности напряжений или дополнять описание преимуществ дисперсного армирования особенностями поведения фибробетона под нагрузкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, трещиностойкость, прочность, низко модульная фибра, высоко модульная фибра, диаграмма деформирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2022 году.

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 752-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

© , 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

EDN: SPRCLI

EVALUATION OF DISPERSION REINFORCEMENT IN CONCRETE IN TERMS OF STRENGTH AND CRACK RESISTANCE

Yury V. Pukhareenko^{1, 2}, Dmitrii A. Panteleev², Mikhail I. Zhavoronkov^{2*}

¹Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

tsik54@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>,
dm-pant@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>,
sith07@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4056-5965>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study was to evaluate the effectiveness of dispersed concrete reinforcement in terms of strength and crack resistance.

Materials and methods. When conducting research, test methods were used, regulated by the provisions of national standards, equipment specially designed for this study was used.

Results. The results of testing fiber-reinforced concretes made using low-modulus and high-modulus fibers are presented.

Discussion and conclusions. As a result of the analysis of the data presented, it is shown that in order to assess the effectiveness and the correct choice of reinforcing fibers, it is not enough to characterise fiber-reinforced concrete only by tensile strength in bending. For a more accurate assessment, it is proposed to use crack resistance characteristics, for example, the critical stress intensity factor, or to supplement the description of the advantages of dispersed reinforcement with the features of the behavior of fiber-reinforced concrete under load.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, crack resistance, strength, low-modulus fiber, high-modulus fiber, deformation diagram.

ACKNOWLEDGMENTS. The article is published based on the results of the research work carried out as part of the competition for research grants by scientific and pedagogical staff of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) in 2022.

The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Pukhareenko Yury V., Panteleev Dmitrii A., Zhavoronkov Mikhail I. Evaluation of dispersion reinforcement in concrete in terms of strength and crack resistance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 752-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

© , 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся активные теоретические и экспериментальные исследования, связанные с подробным изучением свойств фибробетонов, изготовленных с применением различных видов армирующих волокон и цементных матриц [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Полученные результаты включают численные значения прочности, а также силовых и энергетических характеристик трещиностойкости, в том числе модуля упругости, джей-интеграла, критического коэффициента интенсивности напряжений и др. При этом наиболее простым и распространенным способом оценки эффективности дисперсного армирования и, соответственно, применяемой для этого фибры по-прежнему остается сравнение результатов испытаний прочности различных фибробетонов. Однако оценка только по прочности представляется недостаточно информативной и в ряде случаев может привести к формированию противоречивых выводов [11, 12, 13, 14]. Учитывая это, цель написания данной статьи и ее актуальность связаны с получением экспериментальных данных, указывающих на необходимость комплексной оценки эффективности дисперсного армирования бетонов одновременно по показателям прочности и трещиностойкости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для испытаний трещиностойкости использована методика, представленная в ГОСТ 29167, согласно которой проводили испытания стандартных образцов-балок на растяжение при изгибе, при этом строили диаграммы деформирования – графики зависимости прогибов образцов от прилагаемых нагрузок, и с их помощью определяли силовые и энергетические характеристики трещиностойкости [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Испытаниям подвергались образцы-балки размерами 70×70×280 мм. В растянутых гранях образцов был сделан начальный надраз глубиной 25 мм. Образцы изготавливались из мелкозернистого бетона класса по прочности В20 при следующем расходе основных компонентов: цемент 450 кг/м³, песок 1670 кг/м³, вода 315 л/м³. Для приготовления фибробетонной смеси использован кварцевый песок $M_k = 2,3$ и бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108. Перемешивание фибробетонной смеси производилось в лабораторном двухвальном смесителе. Уплотнение смеси осуществлялось с помощью лабо-

раторной виброплощадки. Образцы твердели в шкафу нормального твердения при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и влажности более 95% в течение 28 сут.

Для дисперсного армирования применялась синтетическая полипропиленовая фибра *Fibrin XT*, длиной 12 мм и диаметром 0,025 мм, стальная проволоочная фибра круглого сечения волнового профиля диаметром 0,3 мм и длиной 22 мм, синтетическая полипропиленовая фибра *Durus S500* периодического профиля длиной 48 мм и эквивалентным диаметром 0,7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведены диаграммы деформирования образцов мелкозернистого фибробетона без волокон, а также армированного низко модульной фиброй *Durus S500*. Содержание фибры составляло 0,5% и 1,0% по объему.

По рисунку 1 видно, что разрушающая нагрузка неармированного образца составила 1,7 кН, а соответствующий ей прогиб – 0,056 мм. После прохождения точки с данными координатами кривая деформирования становится резко нисходящей, что свидетельствует о хрупком характере разрушения.

Диаграммы деформирования образцов, армированных фиброй *Durus S500*, в области, близкой к началу координат, практически повторяют аналогичный график неармированного образца. После достижения нагрузки, приводящей к разрушению матрицы, диаграммы фиброармированных образцов также приобретают нисходящий, но более плавный характер, снижаясь до нагрузок 0,5...1,5 кН, в зависимости от содержания фибры в составе композита (рисунок 1, слева). После этого нагрузка снова начинает возрастать, достигая значений 3,0...5,5 кН, а затем плавно снижается до нуля. Повторный подъем нагрузки и ее дальнейшее плавное снижение вплоть до разрушения обусловлены особенностями поведения под нагрузкой фибробетона, армированного низко модульной фиброй: в момент появления трещины в матрице сцепление с ней волокон не нарушается, и начинается их удлинение, обусловленное низким модулем упругости. Этот процесс требует определенных усилий, что и объясняет повторное повышение нагрузки, которую воспринимает образец и которая при определенном содержании волокон может достигать значительных величин.

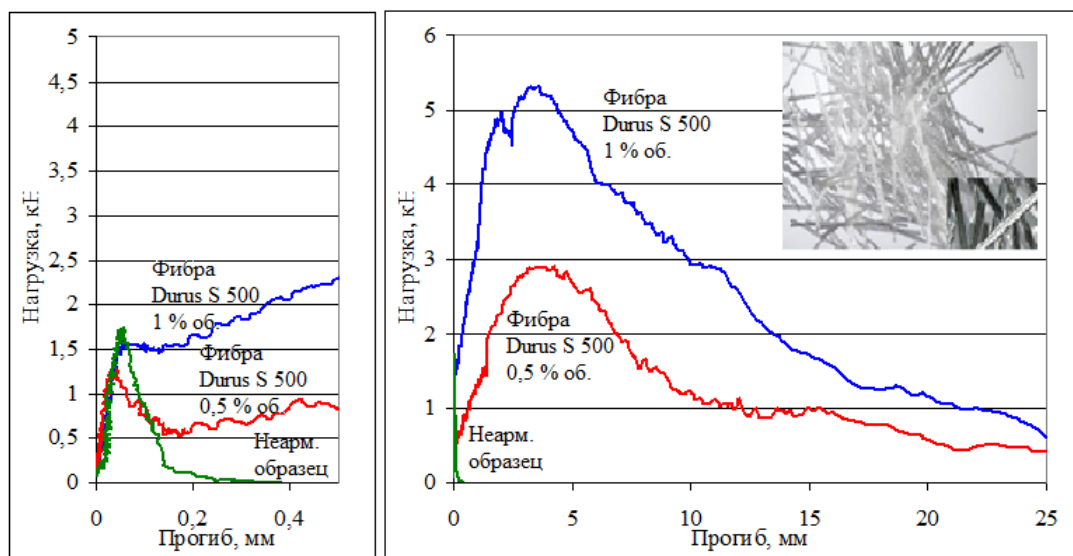


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных фиброй Durus S 500: укрупненный фрагмент диаграмм деформирования (слева); полные диаграммы деформирования (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with Durus S500 fiber: enlarged fragment of deformation diagrams (left); full deformation diagrams (right)
Source: Compiled by the authors.

Таким образом, прочность фибробетона с низко модульными волокнами, рассчитанная по максимальному значению нагрузки, зафиксированной в ходе испытания, может оказаться довольно высокой.

Так, прочность на растяжение при изгибе неармированного образца составила 4,78 МПа, образца с 0,5% фибры Durus S500 уже 8,1 МПа, а образца, армированного 1,0% фибры по объему, 14,9 МПа. В то же время важно отметить, что прогибы фиброармированных образцов в момент достижения максимальной нагрузки могут в десятки раз превысить прогиб неармированного образца и таким образом оказаться выше допустимых значений.

Аналогичную особенность можно проследить и в случае применения для армирования цементных композитов низко модульной фибры другого вида.

На рисунке 2 представлены диаграммы деформирования образцов, армированных низко модульной фиброй Fibrin XT, по которым прослеживается тот же механизм разрушения, что и в случае использования волокон Durus S500: вначале наблюдается момент растрескивания матрицы, по величине нагрузки совпадающий с моментом разрушения

неармированного образца, затем процесс перераспределения усилий преимущественно на волокна и повторное повышение нагрузки после их некоторого удлинения. При этом так же, как и в предыдущем случае, нагрузка принимает более высокие значения в случае большего расхода волокон.

Иначе выглядит на графиках процесс деформирования и разрушения фибробетона, изготовленного с применением высоко модульных волокон в виде стальной проволоочной фибры (рисунок 3).

По полученным диаграммам видно, что для сталефибробетона характерно увеличение предела пропорциональности: нагрузка в момент появления первой трещины значительно превышает разрушающую нагрузку неармированного образца при одинаковом с ним прогибе. В дальнейшем фибробетонный образец последовательно переходит в стадии упругопластического и пластического деформирования с увеличением нагрузки и прогибов. При этом характерного сброса значений по вертикальной оси графиков, как это было при использовании низко модульных волокон, не происходит, а величина прогибов оказывается в несколько раз меньше и составляет 1,2...1,4 мм.

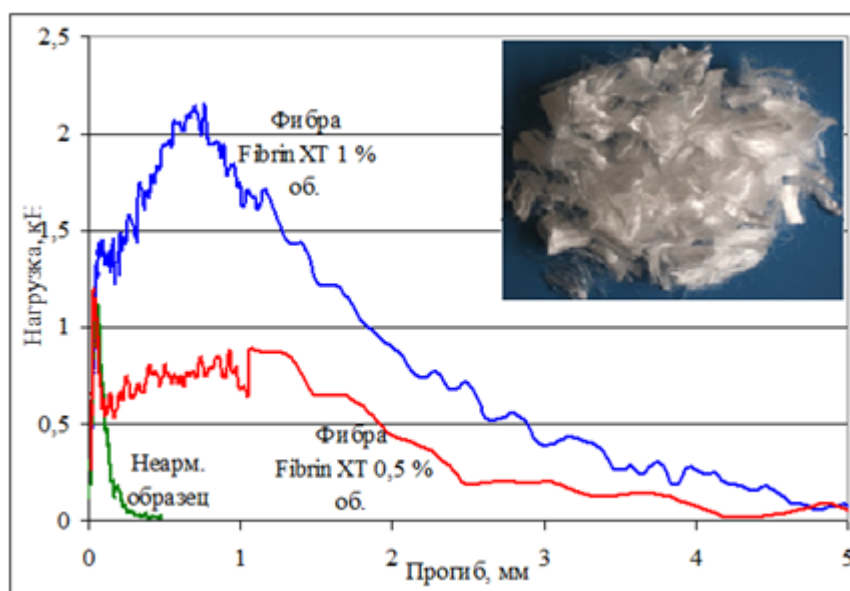


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных фиброй Fibrin XT
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with Fibrin XT fiber
Source: Compiled by the authors.

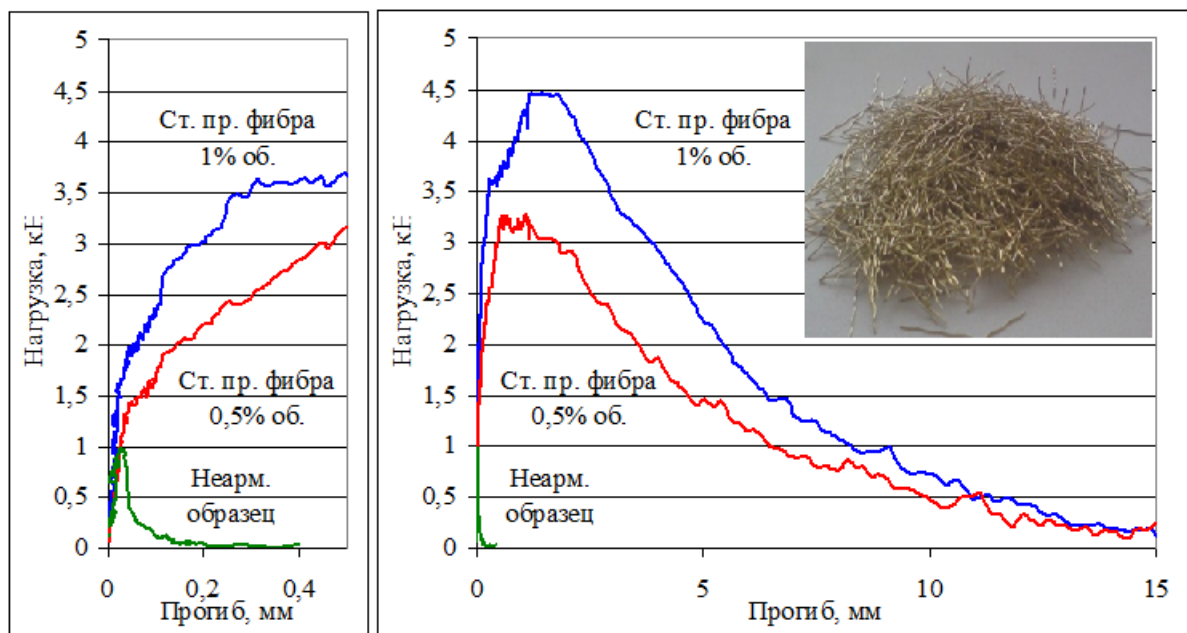


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных стальной проволочной фиброй:
укрупненный фрагмент диаграмм деформирования (слева);
полные диаграммы деформирования (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with steel wire fibers: enlarged fragment of deformation diagrams (left); full deformation diagrams (right)
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что дисперсное армирование бетона низко модульной фиброй не в состоянии сдерживать процесс образования и развития трещин, но при определенном насыщении волокнами может способствовать повышению прочности. При этом значения предельных деформаций также будут составлять весьма значительную величину, что может оказаться неприемлемым по характеру и условиям работы конструкции. Таким образом, оценку эффективности дисперсного армирования только по результатам испытаний прочности следует считать недостаточно информативной и для повышения ее объективности предлагается дополнительно использовать численные значения характеристик трещиностойкости, например, коэффициент интенсивности напряжений. В механике разрушения эта величина характеризует способность материала сопротивляться образованию и развитию трещин. Согласно ГОСТ 29167, коэффициент интенсивности напряжений – величина, определяющая напряженно-деформированное состояние и смещения вблизи вершины трещины.

На рисунках 4 и 5 показаны графики зависимости коэффициента интенсивности напряжений и прочности бетона и фибробетона в зависимости от объемного содержания волокон *Durus S500* и *Fibrin XT*, полученные в ходе обработки представленных выше диаграмм.

На рисунках видно, что прочность фибробетона повышается, особенно при достаточно высоком насыщении бетона волокнами (в данном случае 1% об.). При этом коэффициент интенсивности напряжений остается неизменным при любом содержании волокон. Это значит, что матрица в фибробетоне с низко модульными волокнами разрушается, и в ней появляются трещины примерно при тех же нагрузках, что и при отсутствии армирования, и эффект ее упрочнения в данном случае отсутствует. Таким образом, введение в состав бетона низко модульных волокон не приводит к повышению его трещиностойкости.

На рисунке 6 представлены графики зависимости коэффициента интенсивности напряжений и прочности образцов на растяжение при изгибе от объемного содержания стальной проволочной фибры, из которых следует, что обе исследуемые характеристики повышаются пропорционально объемному содержанию волокон.

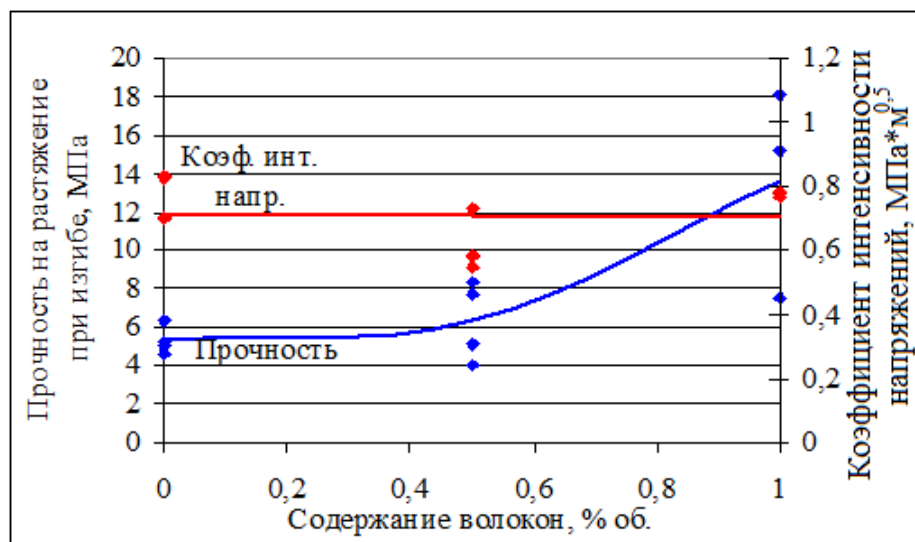


Рисунок 4 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания фибры *Durus S500*
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of *Durus S500* fiber
Source: compiled by the authors.

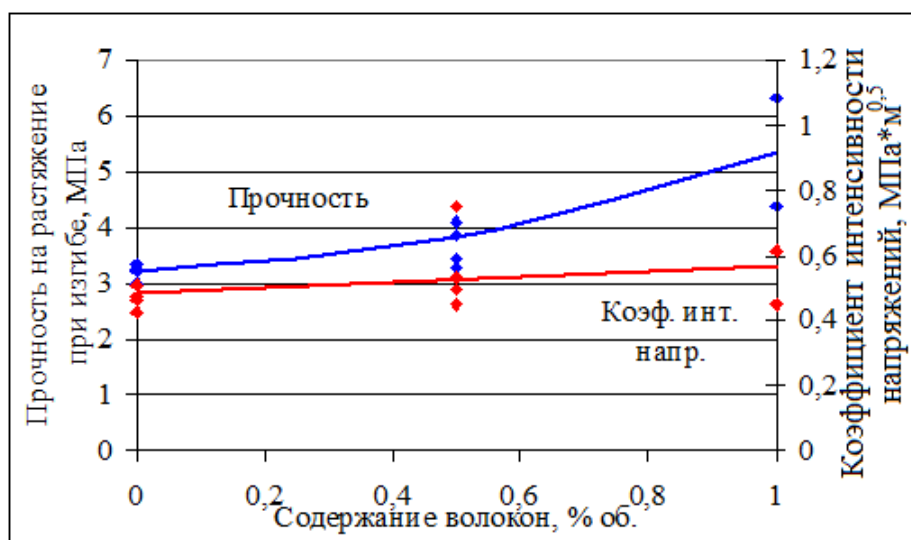


Рисунок 5 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания фибры Fibrin XT
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of Fibrin XT fiber
Source: compiled by the authors.

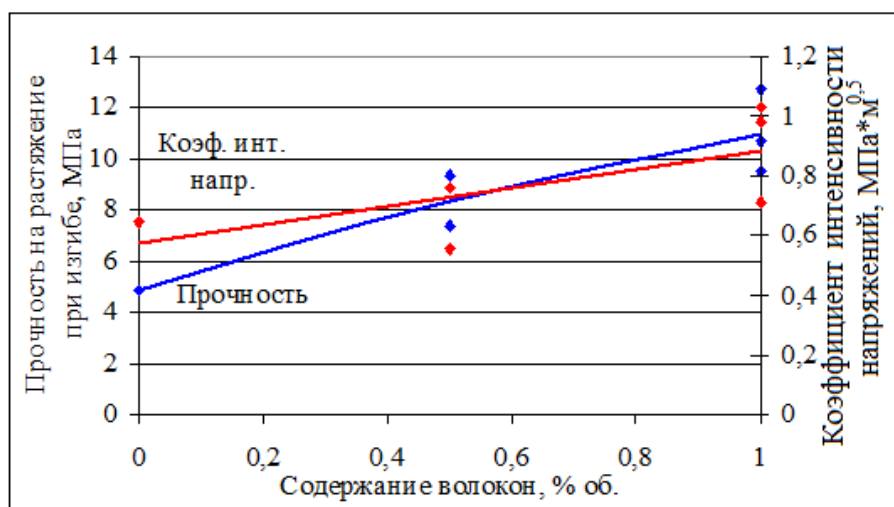


Рисунок 6 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания стальной проволочной фибры
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of steel wire fiber
Source: compiled by the authors.

В результате проведенного анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для полной и объективной оценки эффективности дисперсного армирования бетонов низко модульными волокнами недостаточно характеристики прочности и требуется дополнительно указывать характеристику трещиностойкости, например, коэффициента интенсивности напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(3):436–445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>
2. Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне. *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 39–43.
3. Кострикин М. П. Эффективность дисперсного полиармирования бетона низко модульными волокнами // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 2 (85). С. 128–133.
4. Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 2 (58). С. 167–174.
5. Storm J. A comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete / J. Storm, M. Kaliske, M. Pise, D. Brands, J. Schröder // *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. V. 243. P. 107506.
6. Xu M. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties / Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 266. P. 121173.
7. Степанов М. В., Моисеенко Г. А. Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и высокопрочного сталефибробетона при сжатии // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 3 (83). С. 11–21.
8. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 9–17.
9. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // *Magazine of civil engineering*. 2018. № 1 (77). pp. 90–100.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.
11. Дураченко А. В. К вопросу применения фибробетонов для ремонта дорожных покрытий / А. В. Дураченко // Сборник докладов Международного онлайн-конгресса: фундаментальные основы строительного материаловедения. 2017. С. 303–306.
12. Белькова Н. А. Разработка составов фибробетона для устройства полов и стяжек / Н. А. Белькова, Э. И. Крюков, Д. А. Ткачева // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 3 (22). С. 4–13.
13. Уткин Д. Г. Прочность изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры / Д. Г. Уткин // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1 (93). С. 85–95.
14. Уткин Д. Г. Прочность сжатых и внецентренно сжатых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры / Д. Г. Уткин // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1 (99). С. 99–109.
15. Пухаренко Ю. В. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 301–310.
16. Колчунов В. И., Кузнецов К. Ю., Федоров С. С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плосконапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 3 (95). С. 15–26.
17. Злепко А. Ю. Трещиностойкость фиброцемента армированного стальной проволоочной фиброй // *Молодой ученый*. 2020. № 6 (296). С. 57–61.
18. Зерцалов М. Г., Хотеев Е. А. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона // *Вестник МГСУ*. 2014. № 5. С. 91–99.
19. Коротких Д. Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1) // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. Вып. 26. 2012. С. 56–67.
20. Коротких Д. Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 2) // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. Вып. 27. 2012. С. 54–62.

REFERENCES

1. Pukharenc Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Influence of fiber type and matrix composition on adhesive strength in fiber reinforced concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(3):436-445. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>
2. Puharenko Yu. V., Morozov V. I., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Opredelenie prochnosti scepneniya armiruyushchih volokon s matricej v fibrobetone [Determination of the bond strength of reinforcing fibers with a matrix in a fibrobeton]. *Stroitel'nye materialy*. 2020; 3: 39–43. (in Russ.)
3. Kostrikin M. P. Effektivnost' dispersnogo poliarmirovaniya betona nizkomodul'nymi voloknami [Efficiency of dispersed polishing of concrete with low-modulus fibers]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 128–133. (in Russ.)

4. Chernyshov E. M., Korotkih D. N. Opredelyayushchie sootnosheniya pokazatelej soprotivleniya razrusheniyu cementnyh betonov i parametrov ih struktury [Determining the ratios of indicators of resistance to destruction of cement concretes and parameters of their structure]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2015; 2 (58): 167–174. (in Russ.)

5. Storm J. A., Kaliske M., Pise M., Brands D., Schröder J. comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021; 243: 107506.

6. Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2021; 266: 121173.

7. Stepanov M. V., Moiseenko G. A. Diagrammy deformirovaniya melkozernistogo vysokoprochnogo betona i vysokoprochnogo stalefibrobetona pri szhatii [Diagrams of deformation of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel fiber concrete during compression]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019; 3 (83): 11–21. (in Russ.)

8. Lesovik V. S. Fedyuk R. S. Kompozity novogo pokoleniya dlya special'nyh sooruzhenij [New generation composites for special structures]. *Stroitel'nye materialy*. 2021; 3: 9–17. (in Russ.)

9. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018; 1 (77): 90–100.

10. Rabinovich F. N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, design]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2004. 560. (in Russ.)

11. Durachenko A. V. K voprosu primeneniya fibrobetonov dlya remonta dorozhnyh pokrytij/ A. V. Durachenko [On the use of fibrobetons for repairing road surfaces]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo onlajn-kongressa: fundamental'nye osnovy stroitel'nogo materialovedeniya*. 2017: 303–306. (in Russ.)

12. Bel'kova N. A., Kryukov E. I., Tkacheva D. A. Razrabotka sostavov fibrobetona dlya ustrojstva polov i styazhek [Development of fiber concrete compositions for the construction of floors and ties]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov*. 2019; 3 (22): 4–13. (in Russ.)

13. Utkin D. G. Prochnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noj fibry [Strength of bent reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2021; 1 (93): 85–95. (in Russ.)

14. Utkin D. G. Prochnost' szhatykh i vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnyh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noj fibry [Strength of compressed and eccentrically compressed reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022; 1 (99): 99–109. (in Russ.)

15. Puharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Sovershenstvovanie metodov

opredeleniya silovykh i energeticheskikh karakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Improving methods for determining the power and energy characteristics of fracture resistance of fibrobetone]. *Vestnik MGSU*. 2019. T. 14. Vyp. 3: 301–310. (in Russ.)

16. Kolchunov V. I., Kuznecova K. Yu., Fedorov S. S. Model' kriteriya treshchinostojkosti i prochnosti ploskonapryazhennykh konstrukcij iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona [Model of the criterion of crack resistance and strength of plane-stressed structures made of high-strength fiber concrete and fiber concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2021; 3 (95): 15–26. (in Russ.)

17. Zlepko A. Yu. Treshchinostojkost' fibrocementa armirovannogo stal'noj provolochnoj fibroj [Crack resistance of fiber cement reinforced with steel wire fiber]. *Molodoj uchenyj*. 2020; 6 (296): 57–61. (in Russ.)

18. Zercalov M. G., Hoteev E. A. Eksperimental'noe opredelenie karakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Experimental determination of fracture resistance characteristics of fibrobetone]. *Vestnik MGSU*. 2014; 5: 91–99. (in Russ.)

19. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnyh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ih deformirovaniya (chast' 1) [Patterns of destruction of the structure of high-strength cement concretes based on the analysis of complete equilibrium diagrams of their deformation (part 1)]. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. Vyp. 26. 2012: 56–67. (in Russ.)

20. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnyh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ih deformirovaniya (chast' 2) [Patterns of destruction of the structure of high-strength cement concretes based on the analysis of complete equilibrium diagrams of their deformation (part 2)]. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2012; 27: 54–62. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пухаренко Ю. В. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач.

Пантелеев Д. А. Планирование эксперимента, изготовление контрольных образцов, подготовка текста публикации.

Жаворонков М. И. Проведение испытаний фибробетонных образцов, построение диаграмм деформирования и определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости, подготовка текста публикации.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yury V. Pukharenko. Formation of research area, formulation of goals and objectives.

Dmitrii A. Panteleev. Planning of the experiment, production of control samples, preparing the text for the publication.

Mikhail I. Zhavoronkov. Testing of fiber-reinforced concrete specimens, plotting deformation diagrams and determining the force and energy characteristics of crack resistance, preparing the text for the publication.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пухаренко Юрий Владимирович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой ТСММ; гл. науч. сотр.

Пантелеев Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доц.

Жаворонков Михаил Ильич – канд. техн. наук, доц.

AUTHORS' AFFILIATION

Yury V. Pukhareno – Dr. of Sci., Professor; head of the Technology of Building Materials and Metrology Department; Principal Researcher.

Dmitrii A. Panteleev – Cand. Sci., Associate Professor, Technology of Building Materials and Metrology Department, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>, Scopus Author ID 57226886877, SPbGASU, dm-pant@yandex.ru.

Mikhail I. Zhavoronkov – Cand. of Sci., Associate Professor; Technology of Building Materials and Metrology Department.

УДК 624.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

EDN: XQZPKB

Научная статья



ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ

А. В. Селиванов^{1*}, Ф. Ф. Регер², И. А. Чакурин¹¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),²ЗАО «ПИРС»,

г. Омск, Россия

ant.seliwanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-2690>fedorreger@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3288-7457>chakurin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8414-069X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведены экспериментальные исследования трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия, разработанной авторами.

Материалы и методы. Исследования проводились на железобетонных моделях, изготовленных в масштабе 1:5.

Результаты. При испытаниях установлены три стадии напряженно-деформированного состояния: первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер; вторая – стадия образования и раскрытия трещин; третья – стадия разрушения.

Обсуждение и заключение. Первая стадия наблюдается от начала нагружения до момента образования трещин в продольных ребрах; вторая – между окончанием первой стадии и началом разрушения ребер; третья – при разрушении полки и ребер моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонная плита-оболочка перекрытия, экспериментальные исследования, трещинообразование, предельное равновесие.

Статья поступила в редакцию 13.06.2022; одобрена после рецензирования 29.07.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Селиванов А. В., Регер Ф. Ф., Чакурин И. А. Исследование трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 762-776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

© Селиванов А. В., Регер Ф. Ф., Чакурин И. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

EDN: XQZPKB

STUDY OF CRACK FORMATION AND LIMIT EQUILIBRIUM OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB SHELL

Anton V. Selivanov^{1*}, Fedor F. Reger², Ivan A. Chakurin¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

²ZAO PIRS,

Omsk, Russia

ant.seliwanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-2690>

fedorreger@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3288-7457>

chakurin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8414-069X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Experimental studies of crack formation and limit equilibrium of a reinforced concrete floor slab-shell, developed by the authors, were carried out.

Materials and methods. The studies were carried out on reinforced concrete models made on a scale of 1:5.

Results. During the tests, three stages of the stress-strain state were established: the first is the elastic stage of concrete tensile work in the lower part of the longitudinal contour ribs; the second is the stage of formation and opening of cracks; the third is the stage of destruction.

Discussion and conclusions. The first stage is observed from the beginning of loading until the moment of cracks formation in the longitudinal ribs, the second is between the end of the first stage and the beginning of the destruction of the ribs, the third is during the destruction of the flange and ribs of the models.

KEYWORDS: reinforced concrete floor slab shell, experimental studies, cracking, limiting equilibrium.

The article was submitted 13.06.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Selivanov A. V., Reger F. F., Chakurin I. A. Study of crack formation and limit equilibrium of reinforced concrete floor slab shell. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 762-776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

© Selivanov A. V., Reger F. F., Chakurin I. A., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Со времен начала массового использования железобетона в строительстве железобетонные изогнутые оболочки являлись перспективным направлением. За счет пространственной работы в оболочках практически отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы, что позволяет увеличить несущую способность и уменьшить расход арматуры. Использовать пространственный эффект многие ученые пытались и при работе сборных железобетонных плит перекрытия и покрытия^{1, 2, 3, 4, 5, 6} [1, 2, 3, 4].

Плита-оболочка – это конструкция, имеющая прямоугольный в плане контур, одну из поверхностей криволинейную (в одном или двух направлениях), другую – плоскую⁷.

Во второй половине XX в. в нашей стране было разработано достаточно много различных конструктивных решений сборных железобетонных плит-оболочек. Некоторые из них представлены на рисунке 1.

Каждый из предложенных вариантов конструкции плиты-оболочки имеет свои достоинства и недостатки, но очевидных преимуществ, позволяющих ему конкурировать с пустотными или ребристыми плитами, ни один из них не имеет.

Большинство из предложенных вариантов имели один серьезный недостаток – сложность и трудоемкость изготовления.

Есть предположение, что многие авторы при разработке своей конструкции плиты в последнюю очередь задумывались над технологией ее изготовления или вообще этим вопросом не занимались, считая, что это прерогатива технологов. На практике все новые конструктивные решения реализовывались примитивно, по агрегатно-поточной технологии с увеличением объема ручного труда, что в конечном итоге сказывалось на стоимости изготовления изделий. В результате ни один из вариантов вварушенных или цилиндрических плит не нашел массового применения в практике строительства.

Поскольку при расчете цилиндрической оболочки установлено, что в поперечном направлении почти отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы (3–7% от величины нагрузки), мы пришли к выводу, что данную форму плиты можно реализовать с применением технологии стендового безопалубочного формования. В настоящее время она признана одной из самых современных, позволяющей уменьшить численность обслуживающего персонала в 2–2,5 раза, энергоемкость на 50–70%, повысить производительность производства⁸[5]. При этом данная технология изготовления имеет ряд особенностей: не допускает установку поперечной арматуры (горизонтальной и вертикальной), в то время как форма сечения конструкции может быть практически любой.

¹ Власов В.З. Избранные труды, том I. Москва, Издательство Академии наук СССР, 1962. 528 с.

² Пособие по проектированию армоцементных конструкций (к СНиП 2.03.03-85). Москва, Стройиздат. 1989. 71 с.

³ Боровских А.В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию. Москва, Издательство АСВ. 2002. 320 с.

⁴ Боровских А.В., Шугаев В.В. Силовое сопротивление перекрытий зданий из плит-оболочек. Тезисы докладов научной сессии МОО и научного совета РААСН. «Пространственные конструкции зданий и сооружений». Декабрь 2005. Москва. С.15–16.

⁵ Хайдуков Г.К. Расчет по предельным состояниям ступенчато-вварушенных шатровых панелей: науч. сообщ., вып. 7. АСИА СССР. Москва, Госстройиздат, 1960. 110 с.

⁶ Селиванов А.В., Ререр Ф.Ф. Оптимизация конструкции железобетонной плиты-оболочки с учетом современных тенденций в строительстве [Электрон. ресурс] / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Ререр // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: материалы Международной научно-практической конф. 7–9 декабря 2016 г. / СибАДИ. Омск, 2016. С. 209–216. – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ed2224.pdf>

⁷ Там же

⁸ Малышев А.А. Современные линии безопалубочного формования // Каталог-справочник. Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2009. Вып. 1. С. 20–23.

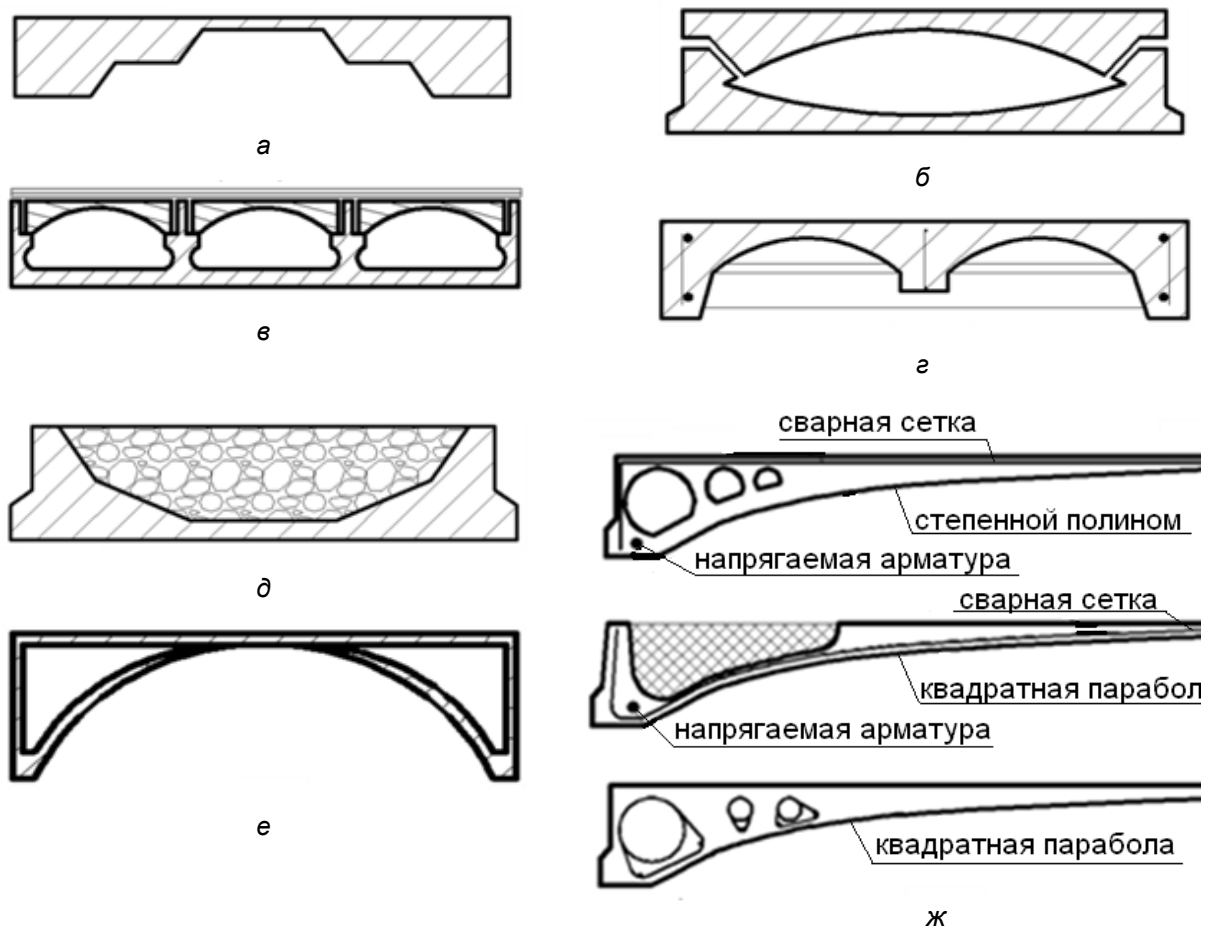


Рисунок 1 – Конструктивные решения впазушенных и цилиндрических плит-оболочек:
 а – ступенчато-впазушенная⁹; б – сдвоенная⁹; в – многопролетная¹⁰; г – кессонная¹¹;
 д – с многогранной верхней поверхностью¹²; е – полая¹³; ж – облежчѐнная [4]

Figure 1 – Structural solutions for curved and cylindrical slab shells:
 а – steptype and curved⁹; б – double⁹; в – multi-span¹⁰; г – coffered¹¹;
 д – with multifaceted top surface¹²; е – hollow¹³; ж – lightweight [4]

⁹ А.с. 739200 СССР, МКИЗ Е 04 В 5/48. Перекрытие / С.В. Карапетян; Ереванский политехнический институт им. К. Маркса (СССР).N 2650709/29-33 ;заявл. 08.06.78 ;опубл. 05.06.80, Бюл. N21.

¹⁰ А.с. 1240845 СССР, МКИЗ Е 04 В 5/02. Перекрытие / Б.Н. Бастатский; Грузинский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт энергетики и гидротехнических сооружений.N 3778380/29-33; заявл. 03.08.84; опубл. 30.06.86, Бюл. N24.

¹¹ А.с. 1300118 СССР, МКИЗ Е 04 В 7/00, Е 04 С 2/00. Железобетонная панель покрытия / О.Д. Дашкевич, В.И. Скрибо; Белорусский технологический институт им. С.М. Кирова.N 3745438/29-33; заявл. 28.05.84; опубл. 30.03.87, Бюл. N12.

¹² Пат. 2013505 РФ : МПК Е 04 В 5/18, Е 04 В 1/82 : Перекрытие / Б.Н. Бастатский, В.А. Федоров, Г.М. Кобахидзе ; Фирма «Гравитас». № 5012401/33; заявл. 25.11.1991; опубл. 30.05.1994, Бюл. № 5.

¹³ Пат. 2082858 РФ : МПК Е04 В 5/02 : Железобетонная плита покрытия / В. И. Травуш, Н. И. Карпенко ; В. И. Травуш. № 94004278 ;заявл. 10.02.1994; опубл. 27.06.1997, Бюл. № 7.

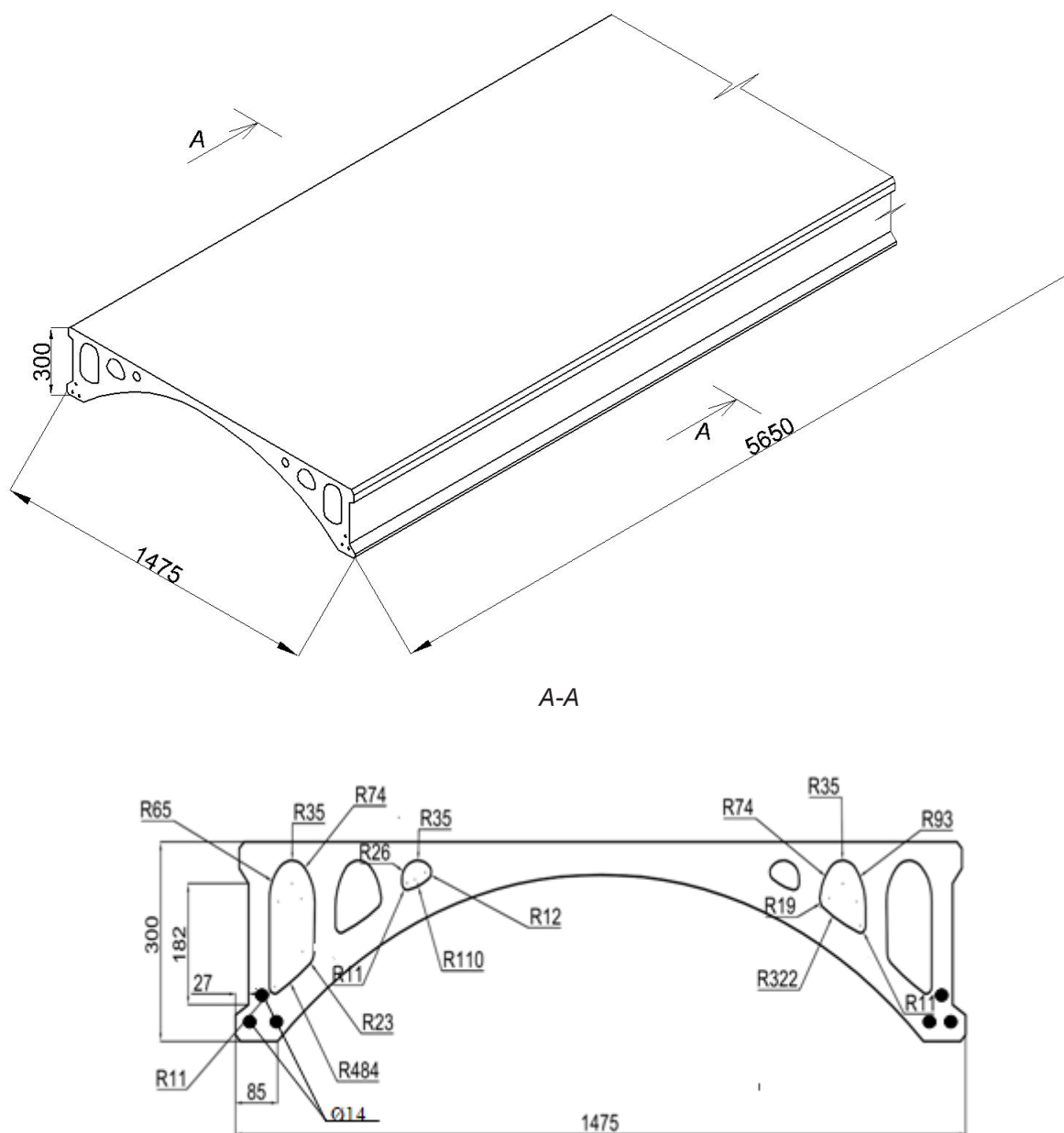
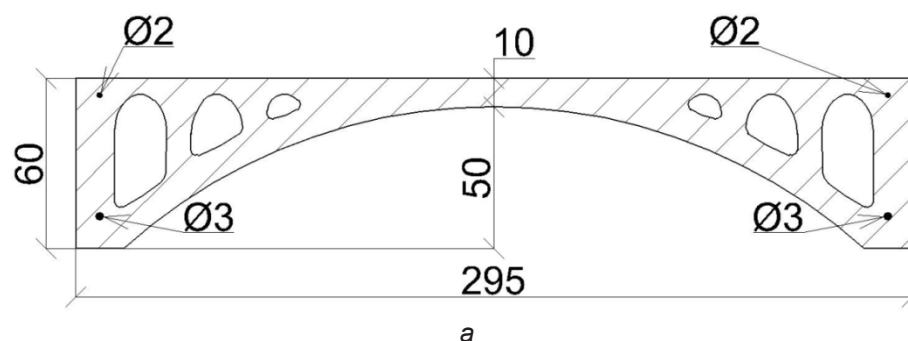


Рисунок 2 – Конструктивное решение плиты-оболочки
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Structural solution of the slab shell
Source: compiled by the authors.



б

Рисунок 3– Вид железобетонной модели:
а – чертеж поперечного сечения; б – фото торца
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Type of reinforced concrete model
a). cross section drawing; b). butt end photo
Source: compiled by the authors.

Нами была предложена железобетонная плита-оболочка¹⁴ [6, 7] (рисунок 2), изготовление которой возможно по технологии безопасного формования, включающая верхнюю горизонтальную полку и нижнюю изогнутую, продольные боковые и промежуточные ребра и продольные пустоты, размещенные между ребрами.

Цель выполненного экспериментального исследования состояла в изучении трещинообразования и предельного равновесия предложенной железобетонной плиты-оболочки перекрытия.

В объем исследования входили следующие задачи:

- испытание моделей исследуемой конструкции нагрузками, постепенно возрастающими

ми от их собственного веса до разрушающих;

- исследование трещинообразования и предельного равновесия плиты-оболочки с пустотами.

Для решения поставленных задач были изготовлены и испытаны железобетонные модели с соблюдением единого масштабного коэффициента 1:5 как в отношении генеральных размеров, так и размеров отдельных деталей конструкции (рисунок 3).

Их продольная рабочая арматура состояла из двух предварительно напряженных канатов диаметром 3 мм, расположенных в нижней части продольных контурных ребер, и двух гладких ненапрягаемых проволок диаметром 2 мм, расположенных в верхней части указанных ребер (см. рисунок 3).

¹⁴ Полез. модель 166449 РФ : МПК Е 04 В 5/43 : Железобетонная плита-оболочка / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Переп ; СибАДИ. № 2016131534/03; заявл. 01.08.2016; опубл. 27.11.2016, Бюл. №33.

Модели изготавливались из пескобетона класса В35, позволяющего выполнять модели с требуемой толщиной элементов, в состав которого входят речной песок (фракции 2–3 мм), гранотсев (фракции 1,5–3 мм), портландцемент и различные добавки (пластификаторы, модификаторы), необходимые для повышения морозоустойчивости и ускорения времени твердения.

Его прочностные и деформационные характеристики были определены по результатам испытаний пяти контрольных призм с размерами 100х100х400 мм.

Призменная прочность (R_b) и модуль упругости бетона (E_b) были определены по методике ГОСТ 24452–80 и составили в среднем $R_b=25,5$ МПа, $E_b=20675$ МПа.

Нагружение образцов до уровня нагрузки, равной $(40\pm 5\%)P_p$, производилось ступенями, равными 10% ожидаемой разрушающей нагрузки, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения 0,6 МПа/с. Продольные относительные деформации призм рассчитывались на всех этапах нагружения, вплоть до их разрушения.

Модуль упругости (E_b) вычислен для каждого образца при уровне нагрузки, составляющем 30% от разрушающей, по формуле

$$E_b = \sigma_1 / \varepsilon_{1y},$$

где $\sigma_1 = P_1 / F$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30% от разрушающей;

здесь P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки;

ε_{1y} – приращение упруго-мгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3 P_p$.

Осредненная диаграмма сжатия, построенная по результатам испытания пяти призм, представлена на рисунке 4.

Стальные канаты, использовавшиеся в качестве нижней продольной рабочей арматуры моделей, испытывались на растяжение на испытательной машине «ИР 5081-5».

Осредненная диаграмма растяжения, определенная по результатам испытания одиннадцати контрольных образцов, представлена на рисунке 5.

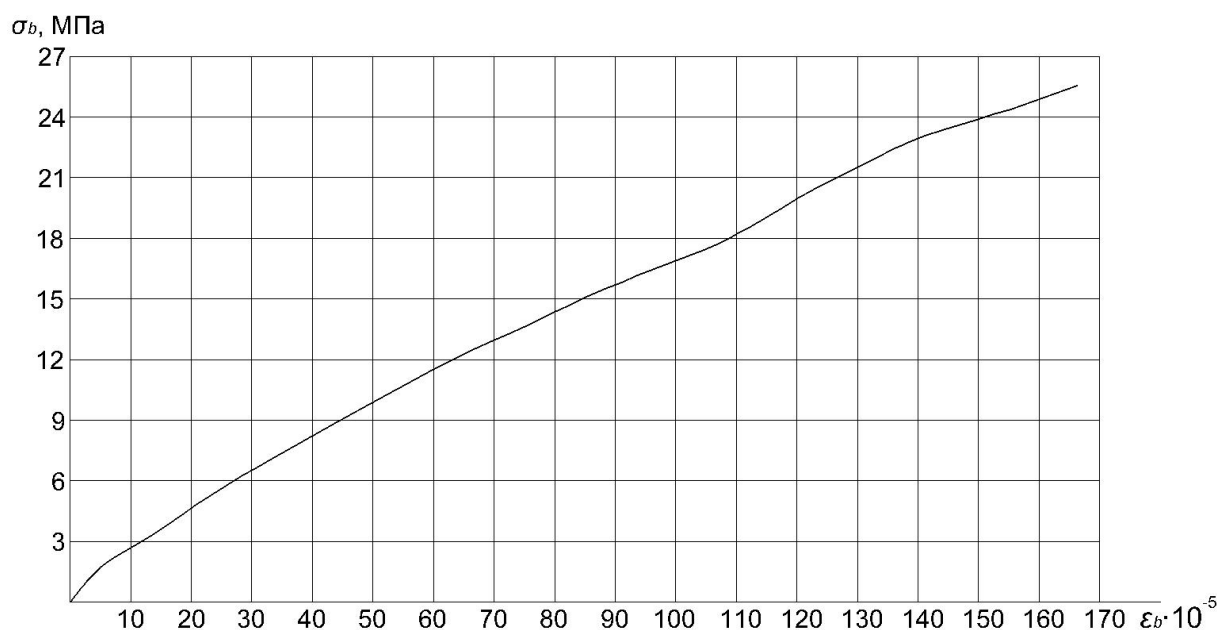


Рисунок 4 – Осредненная диаграмма сжатия мелкозернистого бетона, использованного для изготовления моделей плиты-оболочки перекрытия
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Averaged compression curve of fine-grained concrete used to make floor slab shell models
Source: compiled by the authors.

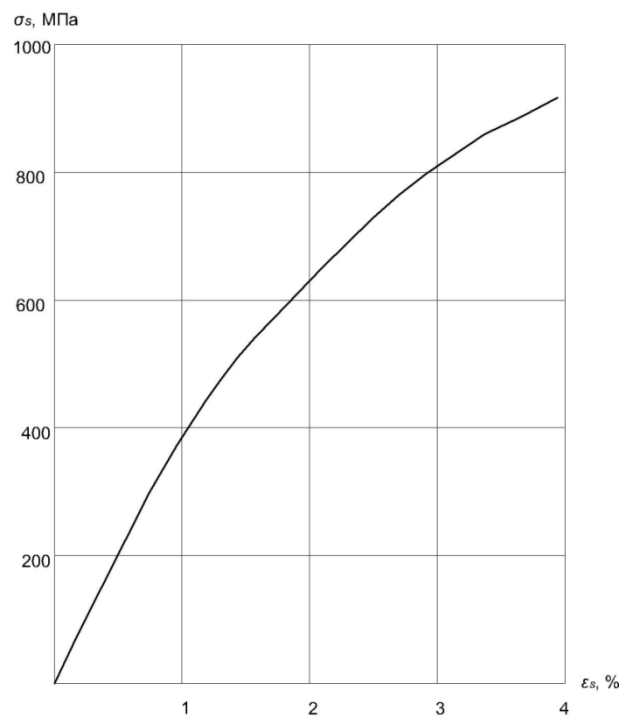


Рисунок 5 – Осредненная диаграмма растяжения канатной арматуры моделей
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Average tension diagram of rope reinforcement of models
Source: compiled by the authors.

Осредненное временное сопротивление продольной рабочей арматуры модели плиты-оболочки, определенное по результатам ее испытаний, составляло

$$\sigma_u = R_{\text{раст}}^{\text{cp}} = 920 \text{ (МПа)}.$$

Нормативное сопротивление продольной рабочей арматуры модели плиты-оболочки рассчитывалось в соответствии с указаниями п.2.3.7 [8] и составляло

$$R_{\text{снм}} = \sigma_{0,2} = 0,8 \sigma_u = 0,8 R_{\text{раст}}^{\text{cp}} = 0,8 \cdot 920 = 736 \text{ (МПа)}.$$

Модели нагружались при помощи испытательной установки, позволяющей получить изгибающий момент, возникающий в середине пролета продольного контурного ребра, максимально приближенный к изгибающему моменту, возникающему в нем при действии равномерно распределенной нагрузки (рисунок 6).



Рисунок 6 – Испытательная установка
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Test setup
Source: compiled by the authors.

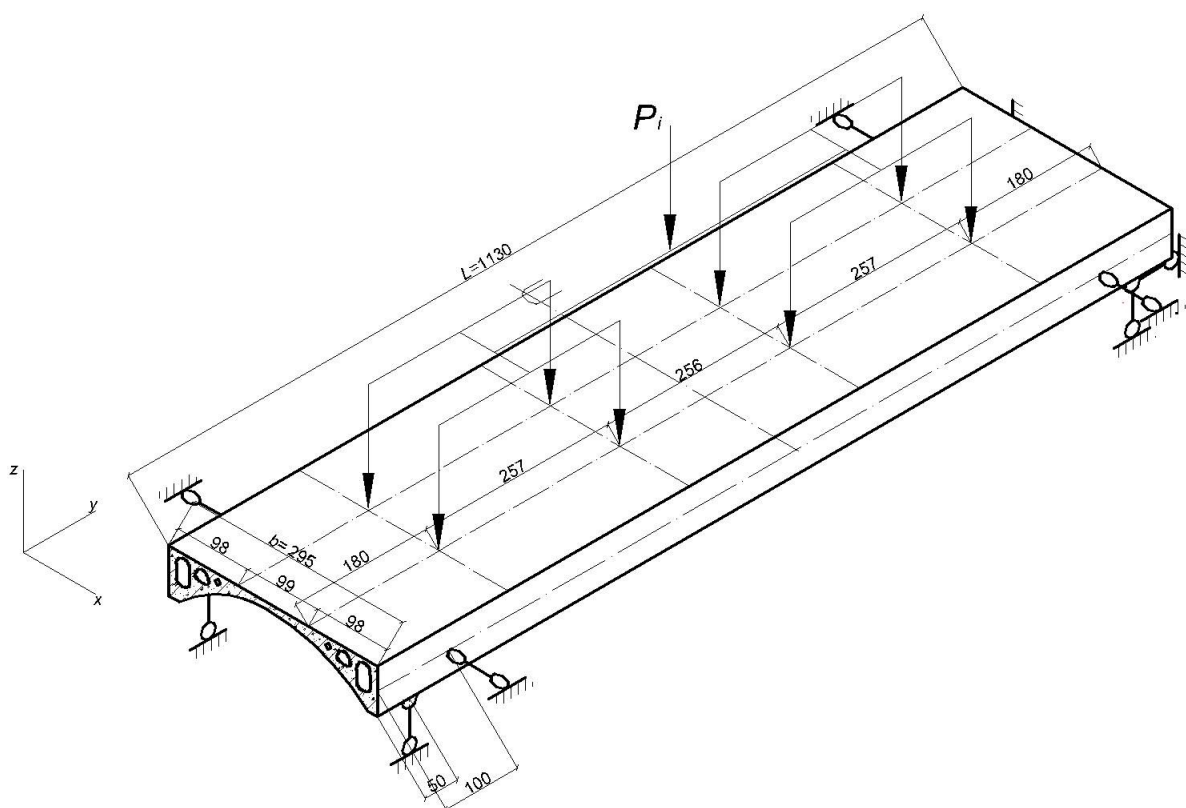


Рисунок 7 – Испытательная схема модели
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Model test circuit
Source: compiled by the authors.

Таблица
Распределение испытательной нагрузки по ступеням
Источник: составлено авторами.

Table
Distribution of test load by stages
Source: compiled by the authors.

№ ступени нагрузки	P_i , МН	q_i , МПа	q_i/q_n
0	0,00017	0,00051	0,042
(нагрузка от собственного веса испытательной установки)			
1	0,00031	0,00092	0,077
2	0,0006	0,0018	0,15
3	0,00117	0,004	0,33
4	0,00156	0,0052	0,43
5	0,00194	0,0058	0,48
6	0,00233	0,0075	0,625
(нагрузка, соответствующая моменту образования трещины в продольных ребрах модели q_{cr})			
7	0,00289	0,0092	0,77
8	0,00327	0,0098	0,82
(нагрузка, контрольная по прочности для модели)			
9	0,0035	0,011	0,92
10	0,0046	0,014	1,17
(предельная (разрушающая) нагрузка)			

Испытательная схема модели показана на рисунке 7.

Испытание каждой модели проводилось постепенным нагружением ступенями, приведенными в таблице, составляющими по 10–15% от ее теоретической несущей способности.

Здесь P_i – сосредоточенная испытательная нагрузка, кН, прикладываемая на текущей ступени;

q_i – равномерно распределенная испытательная нагрузка, кПа, прикладываемая на текущей ступени;

$q_n = 0,012$ кПа – контрольная по прочности равномерно распределенная испытательная нагрузка, рассчитанная по фактическим прочностным характеристикам бетона и арматуры моделей.

Результаты экспериментальных исследований работы железобетонных панелей-оболочек и вспарушенных плит приведены в работах^{15, 16} [9, 10]. Вопросам их моделирования посвящены работы¹⁷ [11, 12, 13, 14, 15].

Аналогично изгибаемым элементам прямоугольного сечения при испытаниях моделей плиты-оболочки с пустотами по мере роста нагрузки установлены три стадии напряженно-деформированного состояния, характеризующие различную работу конструкции:

первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер;

вторая – стадия образования и раскрытия трещин;

третья – стадия разрушения.

¹⁵ Дадашев Х.Д. Исследование вспарушенной плиты положительной гауссовой кривизны: автореф. дис. канд. техн. наук. Баку. 1972. 21 с.

¹⁶ Митякина Н.А. Деформирование составных покрытий из железобетонных панелей-оболочек и оболочек-вставок: автореф.дис. канд. техн. наук. Белгород. 2000. 20 с.

¹⁷ Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. Москва, НИИЖБ, 1979. 421 с.

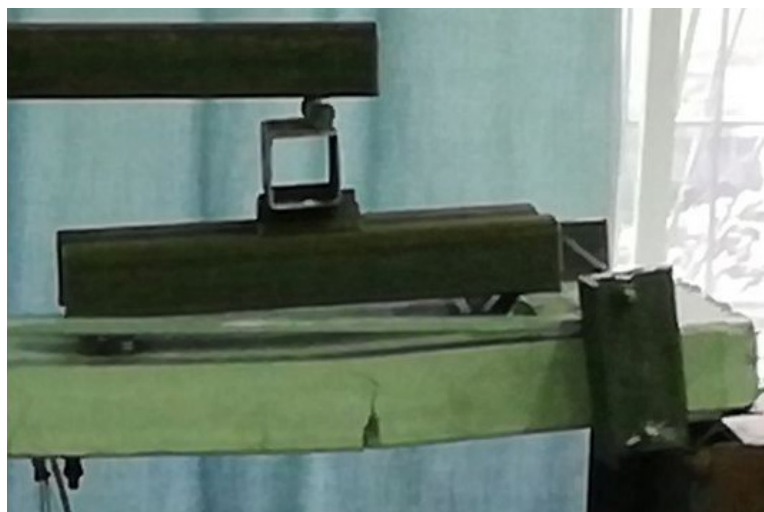
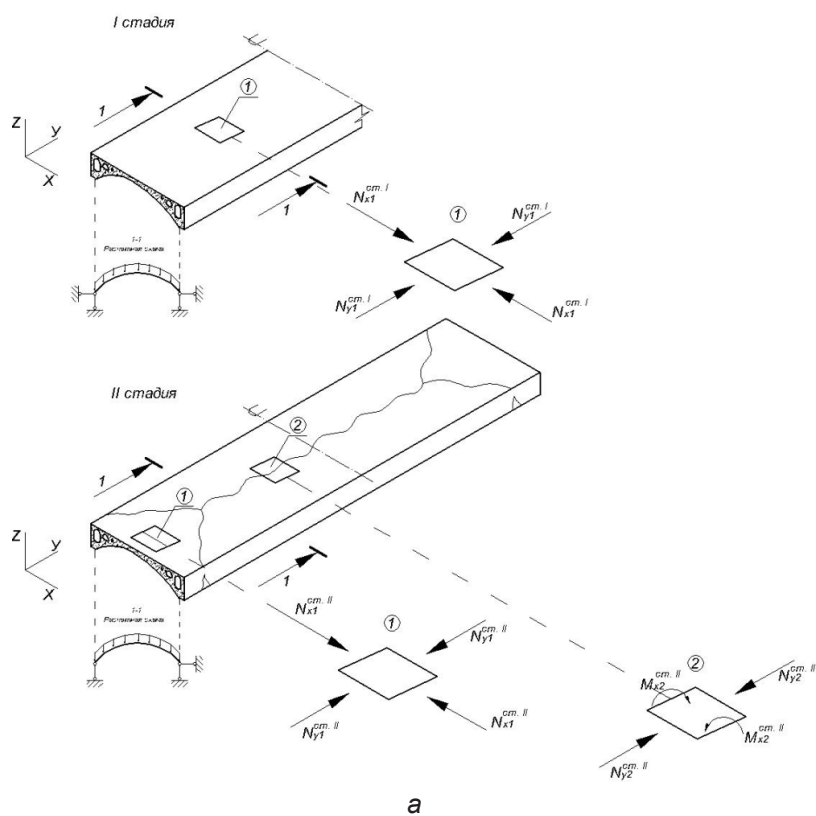


Рисунок 8 – Развитие трещин на второй стадии работы: а – рисунок; б – фото
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Development of cracks in the second stage of work:
a). picture; b). a photo
Source: compiled by the authors.

Первая стадия:
наблюдается при нагрузке

$$q_0 \leq q_1 < q_{crc}, \quad (1)$$

где q_0 – суммарная нагрузка, складывавшаяся из нагрузки от собственной массы модели и нагрузки от собственной массы испытательной установки, опиравшейся на нее;

q_{crc} – нагрузка, соответствующая моменту образования трещины в продольных ребрах, составляющая согласно экспериментам $q_{crc} = (0.51 \dots 0.62) \cdot q_u$;

q_u – предельная (разрушающая) нагрузка, составившая в среднем по трем экспериментам $q_u = 1380 \text{ кгс/м}^2$.

Вторая стадия:
установлена при нагрузке

$$q_{crc} \leq q_2 < q_u. \quad (2)$$

Исследования деформаций показали, что на второй стадии происходит изменение НДС

плиты-оболочки: в приопорной зоне продольного контурного ребра с появлением трещин появляется пластический шарнир (рисунок 8, а), что приводит к постепенному отключению распора. Полка плиты-оболочки постепенно разделяется на две области (см. рисунок 8, а).

В области №2 возникает изгибающий момент $M_{x2}^{\text{ст. II}}$, величина которого остается незначительной практически до разрушения конструкции. При этом установлена прямая связь между шириной раскрытия трещины в продольном контурном ребре и величиной поперечного изгибающего момента.

Третья стадия:
установлена при нагрузке

$$q_3 \cong q_u. \quad (3)$$

Разрушение модели плиты-оболочки начинается с разрушения ее продольных контурных ребер вследствие разрыва арматуры либо потери связи арматуры с бетоном и последующим ее выскальзыванием (рисунок 9).

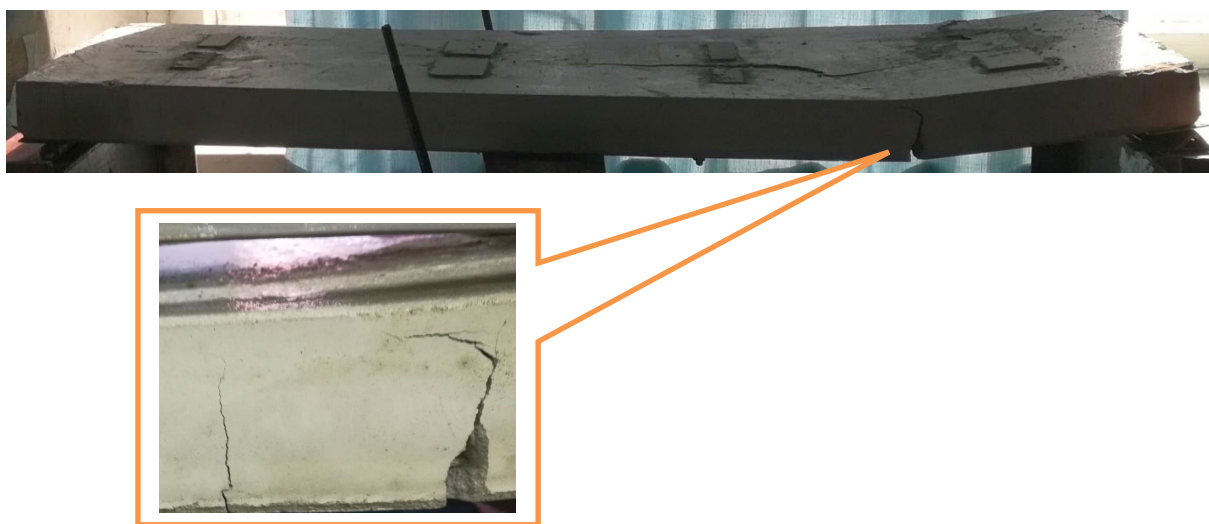


Рисунок 9 – Магистральная нормальная трещина в продольном контурном ребре
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Main normal crack in a longitudinal contour rib
Source: compiled by the authors.



а



б

Рисунок 10 – Сквозные продольные трещины, образующиеся в полке исследуемой плиты-оболочки, в стадии предельного равновесия:
а – на верхней поверхности полки; б – на нижней поверхности полки
Источник: посоставлено авторами.

Figure 10 – Through longitudinal cracks formed in the flange of the studied slab shell, in the stage of limit equilibrium:
on the top surface of the flange; b) on the bottom of the flange
Source: compiled by the authors.

Далее происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, находящихся на границе между областями 1 и 2, и заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине области 2 по ширине. Совокупная схема трещин, образующаяся при разрушении полки, имеет вид конверта (рисунок 10).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При испытаниях моделей установлены три стадии напряженно-деформированного состояния:

первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер;

вторая – стадия образования и раскрытия трещин;

третья – стадия разрушения.

2. Разрушение плиты-оболочки начинается с разрушения ее продольных контурных ребер вследствие разрыва арматуры либо потери

связи арматуры с бетоном и последующим ее выскальзыванием.

Далее происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине полки по ширине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровских А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных плит-оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. М., 2008. С.82–86.

2. Боровских А. В. К вопросу о проектировании железобетонных перекрытий зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. №12(83). С.67–70.

3. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood. UK: MultiSciencePublishingCoLtd., 2011. Pp. 485-490.

4. Баранова Т. И., Сильванович Т. Г., Бормотов А. Н., Селиванов М. Ю. Реализация конструкции

онно-технологических особенностей железобетона при разработке новых типов панелей перекрытий // Известия вузов. Строительство. 1997. № 4. С. 7–9.

5. Копша С. П., Заикин В. А. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // Технологии бетонов. 2013. №11. С. 29–33.

6. Селиванов А. В., Рeger Ф. Ф. Результаты экспериментальных исследований железобетонной плиты-оболочки // Вестник СибАДИ. 2019;16(3):378–392. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-378-392>.

7. Селиванов А. В., Рeger Ф. Ф., Чакурин И. А. О влиянии конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние (НДС) железобетонной плиты-оболочки перекрытия. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(3):446–460. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-446-460>.

8. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции: Общий курс. М.: Стройиздат. 1991. 767 с.

9. Хайдуков Г. К. Экспериментальное исследование предварительно-напряженных ступенчато-вспарушенных (шатровых) панелей. Вып. 11. М. 1961. 109 с.

10. Хайдуков Г. К., Мaгeрaмoв Э. А. Исследование предварительно-напряженных сборных полых панелей-оболочек переменной толщины на квадратном плане // Труды Азербайджанского НИИ-Стройматериалов им. В.А. Дадашева. 1967. 52 с.

11. Людковский А. М. О выборе масштаба при моделировании железобетонных оболочек // Пространственные конструкции зданий и сооружений. М.: Стройиздат. 1985. Вып.5. С.75–81.

12. Стельмах С. И., Хайдуков Г. К. Рекомендации по исследованию пространственных конструкций на моделях // Пространственные конструкции зданий и сооружений. М. 1972. Вып.1. С.164–181.

13. Хайдуков Г. К., Шугаев В. В., Краковский М. Б. Моделирование при исследовании железобетонных пространственных конструкций // Расчет и конструирование железобетонных конструкций. М. Стройиздат. 1972.

14. Чиненков Ю. В. Методика исследования оболочек и складок на моделях // Труды института НИИЖБ Госстроя СССР. М.1974. Вып. 9. Исследования железобетонных пространственных конструкций на моделях.

15. Ярмульник Ф. В., Шарапов Г. В., Гайдук В. Г. Методика подбора материала при исследованиях железобетонных конструкций на моделях. Киев. 1975.

REFERENCES

1. Borovskih A. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya zhelezobetonnyh plit-obolochek [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete shell plates]. *Obzorno-analiticheskij i nauchno – tehnikeskij zhurnal Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. Moscow, 2008. pp.82-86. (In Russ.)

2. Borovskih A. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya zhelezobetonnyh plit-obolochek [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete shell plates]. *Obzorno-analiticheskij i nauchno – tehnikeskij zhurnal Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. Moscow, 2008. pp.82-86. (In Russ.)

3. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood. UK: Multi Science Publishing Co Ltd., 2011. pp. 485-490.

4. Baranova T. I., Sil'vanovich T. G., Bormotov A. N., Selivanov M. Ju. Realizacija konstrukcionno-tehnologicheskij osobennostej zhelezobetona pri razrabotke novyh tipov panelej perekrytij [Implementation of structural and technological features of reinforced concrete in the development of new types of floor panels]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*. 1997; 4: 7–9. (In Russ.)

5. Kopsha S. P., Zaikin V. A. Tehnologija bezopalubochno formovaniya – kljuch k modernizacii promyshlennosti i snizheniju sebestoimosti zhil'ja [Technology of formless molding – the key to modernization of industry and reduction of housing costs]. *Tehnologii betonov*. 2013; 11: 29-33. (In Russ.)

6. Selivano A.V., Reger F.F. Results of experimental research of the reinforced concrete shell-slab. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(3):378-392. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-378-392>

7. Selivanov A.V., Reger F.F., Chakurin I.A. On influence of structural features on stress-strain state of a reinforced concrete floor slab. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(3):446-460. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-446-460>

8. Bajkov V. N., Sigalov Je. E. *Zhelezobetonnye konstrukcii: Obshhij kurs* [Reinforced concrete structures: General course]. Moscow: Strojizdat. 1991. 767 p. (In Russ.)

9. Hajdukov G. K. *Jeksperimental'noe issledovanie predvaritel'no-naprjazhennyh stupenchatovosparusennyh (shatrovyh) panelej* [Experimental study of pre-stressed step-raised (hipped) panels]. Vyp. 11. Moscow, 1961. 109 p. (In Russ.)

10. Hajdukov G. K., Mageramov Je. A. Issledovanie predvaritel'no-naprjazhennyh sbornyh pologih panelej-obolochek peremennoj tolshhiny na kvadratnom plane [Investigation of prestressed prefabricated sloping panels-shells of variable thickness on a square plan]. *Trudy Azerbajdzhanskij NIISTroymaterialov im. V. A. Dadasheva*. 1967. 52 p. (In Russ.)

11. Ljudkovskij A. M. O vybore masshtaba pri modelirovanii zhelezobetonnyh obolochek [On the choice of scale in the modeling of reinforced concrete shells // Spatial structures of buildings and structures]. *Prostranstvennye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij*. Moscow: Strojizdat. 1985. Vyp.5. pp.75-81. (In Russ.)

12. Stel'mah S. I., Hajdukov G. K. Rekomendacii po issledovaniju prostranstvennyh konstrukcij na modeljah [Recommendations for the study of spatial structures on models]. *Prostranstvennye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij*. Moscow, 1972; Vyp.1:164-181. (In Russ.)

13. Hajdukov G. K., Shugaev V. V., Krakovskij M. B. Modelirovanie pri issledovanii zhelezobetonnyh prostanstvennyh konstrukcij [Modeling in the study of reinforced concrete spatial structures]. *Raschet i konstruirovaniye zhelezobetonnyh konstrukcij*. Moscow, Strojizdat. 1972. (In Russ.)

14. Chinenkov Ju. V. Metodika issledovaniya obo-lochek i skladok na modeljah [Methodology for the study of shells and folds on models]. *Trudy instituta/NIIZhB Gosstroja SSSR*. M.1974. vyp. 9. Issledovaniya zhelezobetonnyh prostanstvennyh konstrukcij na modeljah. (In Russ.)

15. Jarmul'nik F. V., Sharapov G. V., Gajduk V. G. *Metodika podbora materiala pri issledovaniyah zhelezobetonnyh konstrukcij na modeljah* [Technique of selection of material in the study of reinforced concrete structures on models]. Kiev. 1975. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Селиванов А. В. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, оформление статьи. Вклад соавтора составляет 40%.

Регер Ф. Ф. Руководство и участие в подготовке и проведении экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, редактирование статьи. Вклад соавтора составляет 40%.

Чакурин И. А. Редактирование и оформление статьи. Вклад соавтора составляет 20%.

CONTRIBUTION OF CO-AUTHORS

Anton V. Selivanov. *Preparation and conduct of experimental studies, processing of the results, the design of the article. The contribution of the co-author is 40%.*

Fedor F. Reger. *Management and participation in the preparation and conduct of experimental studies, analysis of the results, editing the article. The contribution of the co-author is 40%.*

Ivan A. Chakurin. *Editing and design of the article. The contribution of the co-author is 20%.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Селиванов Антон Валерьевич – ст. преп., кафедре «Мосты и тоннели».

Регер Федор Федорович – канд. с.-х. наук.

Чакурин Иван Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные конструкции».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Selivanov – Senior Lecturer, Bridges and Tunnels Department.

Fedor F. Reger – Cand. of Sci.

Ivan A. Chakurin – Cand. of Sci., Associate Professor, Bridges and Tunnels Department.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

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 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 – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.