

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2026-23-1

TOM 23, № 1. 2026

VOL. 23, No. 1. 2026



Учредитель и издатель:

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

644050, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 65-03-09;

АДРЕС РЕДАКЦИИ

644050, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 60-71-26;

Издается с 2004 года
Периодичность издания – 6 раз в год
Подписной индекс в каталоге
ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

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

644050, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 65-03-09

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

644050, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 60-71-26

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2026

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:

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

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

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

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

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 20.02.2026. Дата выхода в свет 20.02.2026. Формат 60×84 ¼ Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

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)», 2026

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

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

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



Signed in print on 20.02.2026. Publication date is 20.02.2026. 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)", 2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

Ефименко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доц., проректор по научной работе. ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия.
Scopus Author ID 56487412400, **Researcher ID** AAB-7416-2020, **ORCID ID** 0000-0001-7064-1418

Буриянов Александр Федорович, д-р техн. наук, доц., исполнительный директор. НО «Российская Гипсовая Ассоциация», г. Москва, Россия.
Scopus Author ID 55975665000, **Researcher ID** AAЕ-4850-2022, **ORCID ID** 0000-0002-3331-9443

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** 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. Российская Академия Естественных наук, 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» Донской государственный технический университет, 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** 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 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. наук, проф. 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** 0000-0002-2915-982X

Матвеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 56297305000, **Researcher ID** Y-3137-2018
ORCID ID 0000-0001-7362-0399

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

Мещеряков Виталий Александрович, д-р 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. д-р наук, доц. инженерного факультета.
Международный дистанционный университет 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, проф.
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, проф.
Университет Западной Богемии, г. Пльзень, Чехия.
Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011,
ORCID ID 0000-0001-8886-4281

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

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

Федюк Роман Сергеевич, д-р техн. наук, доц, проф.
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.
Scopus Author ID 57199850188, **Researcher ID** N-6730-2017,
ORCID ID 0000-0002-2279-1240

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

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

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., проф.
Мичиганский технологический университет, 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

Мороз Галина Владимировна, редактор, ответственный секретарь, e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

Рахуба Лилия Федоровна, переводчик, e-mail: lira_omsib@mail.ru

Максимюк Елена Валентиновна, переводчик, e-mail: grechko_ev@mail.ru

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

Scopus Author ID 57212171087, **ORCID ID** 0000-0001-7312-1557

Construction and architecture

Sergey V. Efimenko, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Science Federal State Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Architecture and Building», Tomsk, Russia

Scopus Author ID 56487412400,
Researcher ID AAB-7416-2020,
ORCID ID 0000-0001-7064-1418

Aleksandr F. Buryanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Executive Director, NO Russian Gypsum Association, Moscow, Russia

Scopus Author ID 55975665000,
Researcher ID AAE-4850-2022, **ORCID ID** 0000-0002-3331-9443

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

Roman S. Fediuk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Far Eastern Federal University FEFU, Vladivostok, Russia
Scopus Author ID 57199850188, **Researcher ID** N-6730-2017, **ORCID ID** 0000-0002-2279-1240

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

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

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, Bialystok, Poland
Scopus Author ID 9843546900, **Researcher ID** N-3447-2017, **ORCID ID** 0000-0001-7052-9602

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

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

Galina V. Moroz
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

Liliya F. Rakhuba
Journal Interpreter
e-mail: lira_omsib@mail.ru

Elena V. Maksimyyuk
Journal Interpreter
e-mail: grechko_ev@mail.ru

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

**РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ***Р.Ф. Салихов, И.А. Шутанов, В.В. Дубков*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА ВЕЛИЧИНУ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА СТАРТЕРОМ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ БУЛЬДОЗЕРА	12
---	-----------

И.В. Лесковец, А.А. Грачев

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ВЕДУЩИХ КОЛЕСАХ ГУСЕНИЧНОГО БУЛЬДОЗЕРА	28
--	-----------

И.С. Тюремнов

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРУНТА	40
--	-----------

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ*А.О. Тишкова, Н.Н. Якунин, Н.В. Якунина*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК С УЧЁТОМ УСТОЙЧИВОСТИ	62
--	-----------

Н.И. Соколов, О.А. Шаламова, В.И. Кочергин

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC.....	76
---	-----------

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*А.А. Решетова, Э.Н. Медведева, Е.Л. Усова, М.С. Плесовских, О.И. Королева*

КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ И СИЛИКАТА НАТРИЯ.....	90
---	-----------

В.С. Лесовик, В.А. Дудченко, А.С. Сальникова, О.В. Казлитина

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	102
---	------------

М.А. Рюмкин, В.А. Шнайдер

КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПУТЁМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ	114
---	------------

Т.Ю. Гагарина, Н.П. Александрова, А.С. Александров

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУСТОТ ПРИ РАСЧЕТЕ КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ	130
--	------------

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Rinat F. Salikhov, Ivan A. Shutanov, Valery V. Dubkov

EFFECT OF POWER PLANT ENGINE TEMPERATURE ON THE AMOUNT OF CURRENT CONSUMED BY THE STARTER WHEN DIAGNOSING A BULLDOZER..... 13

Igor' V. Leskovets, Aleksey A. Grachev

SIMULATION MODEL OF THE FORMATION OF LOADS ON THE DRIVING WHEELS OF A TRACKED BULLDOZER..... 29

Ivan S. Tyuremnov

FEATURES OF INTERACTION MODES OF VIBRATORY ROLLER DRUM AND SOIL SURFACE 41

PART II. TRANSPORT

Anastasiya O. Tishkova, Nikolay N. Yakunin, Natalya V. Yakunina

ASSESSMENT METHODOLOGY OF THE ORGANIZATION LEVEL OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION WITH STABILITY CONSIDERATION..... 63

Nikolay I. Sokolov, Oksana A. Shalamova, Victor I. Kochergin

ORGANIZATION OF REVERSIBLE TRAFFIC BASED ON MODELING IN ANYLOGIC ENVIRONMENT..... 77

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Antonina A. Reshetova, Elza N. Medvedeva, Elena L. Usova, Maksim S. Plesovskih, Olga I. Koroleva

COMPOSITIONS BASED ON ASH AND SLAG WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS AND SODIUM SILICATE 91

Valery.S. Lesovik, Valeria A. Dudchenko, Alyona S. Salnikova, Olga V. Kazlitina

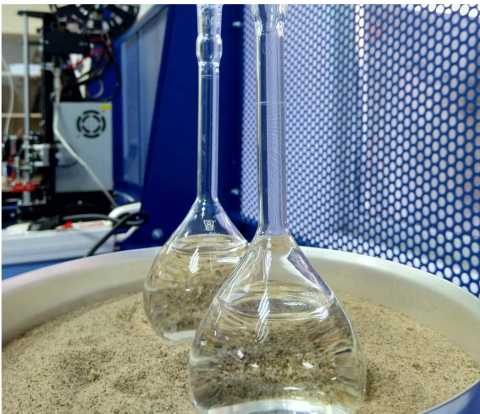
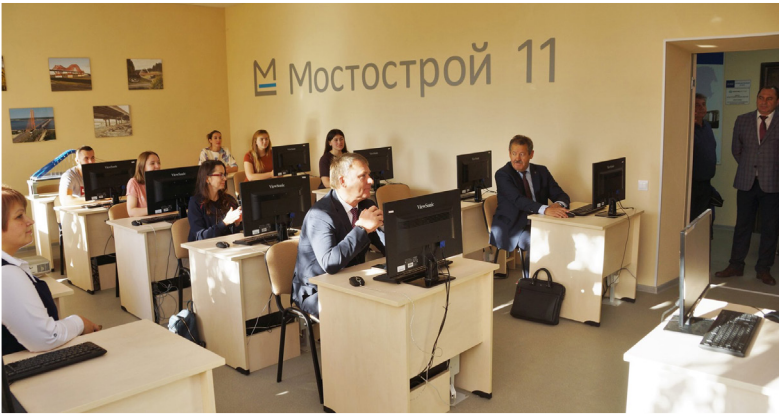
COMPOSITE BINDERS WITH PRODUCTS OF BUILDING MATERIALS RECYCLING 103

Maxim A. Ryumkin, Victoria A. Schneider

CONCEPT OF INCREASING TRAFFIC CAPACITY BY REGULATING TRAFFIC FLOWS BASED ON MACHINE VISION 115

Tatyana Yu. Gagarina, Natalya P. Aleksandrova, Anatoliy S. Aleksandrov

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF AIR VOID CONTENT IN THE CALCULATION OF CRITICAL CRACK LENGTH IN ASPHALT CONCRETE 131



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



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

Научная статья
УДК 621.43
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-27>
EDN: SADASY



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА ВЕЛИЧИНУ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА СТАРТЕРОМ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ БУЛЬДОЗЕРА

Р.Ф. Салихов ✉, И.А. Шутанов, В.В. Дубков

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
salikhornat@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье представлены методика проведения экспериментов и их результаты, показывающие взаимосвязь между величиной размаха сигнала потребляемого тока и скоростью приращения давления моторного масла, температурой охлаждающей жидкости дизельного двигателя силовой установки в условиях низких температур. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью снижения трудоемкости, продолжительности проведения технического диагностирования строительной техники, в частности бульдозера, особенно это актуально в полевых условиях Крайнего Севера. В настоящее время время исследования величины потребляемого тока проведены только для положительных температур (от 40 до 90 градусов Цельсия). При изменении температуры окружающего воздуха авторами было замечено, что исследуемый диагностический параметр (величина потребляемого тока) обладает нестабильностью, неоднозначностью показаний и требует корректировки. Требования прогревания дизельного двигателя силовой установки повышают простои в ожидании проведения диагностики. Пусковые отказы двигателя силовой установки приводят к нарушению условий для диагностики герметичности надпоршневого пространства путём измерения величины потребляемого тока. Поэтому целью исследования является получение зависимостей между величиной потребляемого тока стартером и скоростью приращения давления моторного масла, температурой охлаждающей жидкости двигателя силовой установки в условиях низких температур.

Материалы и методы. В данном разделе представлены методика и результаты проведенных экспериментов. Эксперименты проводились на дизельном, 6-цилиндровом, рядном двигателе силовой установки бульдозера Shantui SD 22 в полевых условиях при отрицательных температурах.

Результаты. На основании анализа экспериментальных данных были построены математические зависимости между величиной размаха сигнала потребляемого тока двигателем силовой установки и скоростью приращения давления моторного масла, температурой охлаждающей жидкости.

Обсуждение и заключение. Расширение функциональных возможностей применения метода относительной компрессии позволяет сократить трудоемкость диагностических операций, входящих в состав технического обслуживания №3 (которое проводится через каждую тысячу моточасов) у бульдозера марки Коматцу Д-355А на 8%, а трудоемкость диагностики самого дизельного двигателя силовой установки сокращается на 24%. Проведенные исследования позволяют ввести корректирующие коэффициенты и тем самым обеспечить заданную точность измерений и сократить трудоемкость, продолжительность, повысить контролепригодность технического диагностирования дизельного двигателя силовой установки строительных машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силовая установка, дизельный двигатель силовой установки, бульдозер, величина потребляемого тока, величина размаха сигнала, температура охлаждающей жидкости, скорость приращения давления, диагностика

Статья поступила в редакцию 06.06.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Салихов Р.Ф., Шутанов И.А., Дубков В.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Салихов Р.Ф., Шутанов И.А., Дубков В.В., Влияние температуры двигателя силовой установки на величину потребляемого тока стартером при диагностировании бульдозера // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 12-27. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-27>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-27>

EDN: SADASY

EFFECT OF POWER PLANT ENGINE TEMPERATURE ON THE AMOUNT OF CURRENT CONSUMED BY THE STARTER WHEN DIAGNOSING A BULLDOZER

Rinat F. Salikhov ✉, Ivan A. Shutanov, Valery V. Dubkov
The Siberian State Automobile and Highway University (SiBADI),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
salikhorinat@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. This article presents a methodology for conducting experiments as well as their results which show the relationship between the signal range magnitude of the current consumed and the rate of increase in engine oil pressure, the coolant temperature of a power plant diesel engine operating at low temperatures. The relevance of this study is determined by the need to reduce the complexity and time of technical diagnostics of construction equipment, in particular a bulldozer, which is of special importance in the field conditions of the Far North. Current consumption studies have been focused on positive temperature ranges (from 40 to 90 degrees Celsius). According to the authors' observations, when the ambient temperature changes, the diagnostic parameter under study (the amount of current consumed) is characterized by instability, reading ambiguity and requires correction. The need to warm up the diesel engine of the power pack increases the waiting time necessary for diagnostics. Starting failures of a power pack internal combustion engine lead to the violation of conditions for leak tightness diagnostics of the space above a piston by measuring the amount of current consumed. Therefore, the aim of the study is to determine relationship between the amount of current consumed by the starter and the rate of increase in engine oil pressure, the coolant temperature of a power pack diesel engine operating at low temperatures.

Materials and methods. This section presents the methodology and the results of the experiments. The experiments were carried out with a 6-cylinder diesel inline engine of the power pack of the Shantui SD 22 bulldozer in the field conditions at subzero temperatures.

Results. Based on the analysis of experimental data, mathematical dependences were constructed between the magnitude of the signal range of the current consumed by the power pack engine and the rate of increase in engine oil pressure, and the coolant temperature.

Discussion and conclusion. Expanding of the functionality of the relative compression method reduces labor content of diagnostic operations included in maintenance No. 3 (which is carried out every thousand operating hours) for Komatsu D-355A bulldozer by 8%, and labor content of diagnosing the diesel engine power pack itself is reduced by 17%. The research undertaken makes it possible to introduce correction coefficients and thereby to ensure the specified measurement accuracy and the reduced complexity and time, to improve the controllability of technical diagnostics of power plant diesel engines in construction machinery.

KEYWORDS: power pack; diesel engine of the power pack; bulldozer; the amount of current consumed; the magnitude of the signal range; coolant temperature; pressure rate increase; diagnostics

The article was submitted: June 06, 2025; approved after reviewing: January 20, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Salikhov R.F., Shutanov I.A., Dubkov V.V., The effect of the power plant engine temperature on the amount of current consumed by the starter when diagnosing a bulldozer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2026; 23 (1): 12-27. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-27>

© Salikhov Rinat F., Shutanov Ivan A., Dubkov Valery V., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Бульдозер является одним из наиболее востребованных видов строительной техники, применяемой при возведении различных сооружений. Тягово-скоростные показатели напрямую зависят от технического состояния различных систем бульдозера: двигателя внутреннего сгорания, гидропривода, движителя, режущих элементов рабочего оборудования.

Авторами проводились исследования технологической карты обслуживания бульдозера марки Д-355А одного из эксплуатационных предприятий. Исследования показали, что общая трудоемкость при ТО-3 данного бульдозера составляет 17,91 чел.-ч.

Диагностирование двигателя внутреннего сгорания силовой установки бульдозера имеет значительную долю в общем объеме диагностических работ (рисунок 1).

Согласно МДС 12.8–2007 «Рекомендации по организации технического обслуживания и ремонта строительных машин» в состав технического обслуживания ТО-3 бульдозера входит измерение диагностического параметра, такого как компрессия двигателя силовой установки.

Проведение технического диагностирования дизельного двигателя силовой установки (ДДСУ) бульдозера переносными приборами является трудоемкой операцией (рисунок 2).

Трудоемкость технологической операции «Измерение компрессии» ДДСУ составляет 2 чел.-ч. Учитывая личный опыт авторов, на замер относительной компрессии и анализ герметичности надпоршневого пространства цилиндров ДДСУ затрачивается в среднем 0,83 чел.-ч. Проведение диагностики методом ОК составляет 0,65 чел.-ч (с учетом подготовительно-заключительного времени) и 0,18 чел.-ч затрачивается на обработку и анализ полученных данных. Впоследствии авторы планируют сократить продолжительность обработки и анализа результатов измерения путем доработки программного обеспечения мотор-тестера.

Внедрение метода измерения герметичности надпоршневого пространства по величине потребляемого тока позволит сократить трудоемкость диагностических операций ТО-3 бульдозера марки Коматцу Д-355А на 8%, отдельно ДДСУ – на 24 %.

При проведении технического диагностирования двигателя силовой установки в полевых условиях диагност сталкивается с большими трудностями. Тяжелые условия работы, кото-

рые подразумевают под собой влияние климатических условий (дождь, снег и т.д.), наличие строительной пыли (цемент, песок, грунт) на поверхностях агрегатов (перенапряжение увеличивает риск падения и получения травм) увеличивают объем подготовительных работ, усложняют процесс проведения технического диагностирования.

Работа в полевых условиях требует значительных физических усилий, длительного нахождения на ногах, работы в неудобных позах, в результате чего наблюдается снижение уровня концентрации специалиста. Тем самым увеличивается риск появления ошибок при проведении диагностики. Поэтому необходимо улучшать условия работы диагноста и снижать трудоемкость проведения диагностики путем разработки новых и совершенствования существующих методов диагностики и автоматизации процессов проведения технического диагностирования.

На сегодняшний день для сокращения трудоемкости проведения диагностирования ДДСУ строительных машин применяются методы безразборной диагностики состояния цилиндрико-поршневой группы (ЦПГ), газораспределительного механизма (ГРМ), герметичности прокладки головки блока цилиндров (ГБЦ).

Понятие «силовая установка» подразумевает не жесткое соединение двигателя внутреннего сгорания и коробки передач, а пневматическое, гидравлическое или электрическое. На строительных машинах в большинстве случаев силовая установка состоит из дизельного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания и гидротрансформатора.

В данной статье авторы акцентируют внимание именно на проведении технического диагностирования дизельного двигателя силовой установки.

Для оценки технического состояния дизельного ДДСУ применяются различные параметры, в числе которых абсолютная и относительная компрессии (ОК).

Метод измерения абсолютной компрессии подразумевает под собой измерение компрессии при помощи компрессометра/компрессографа последовательно в каждом цилиндре.

Метод ОК применяется при диагностировании бензиновых и дизельных двигателей силовых установок, но только для определения разницы между величиной компрессии отдельно работающих цилиндров. Величина же вклада каждого цилиндра отдельно в абсолютных единицах не измеряется.

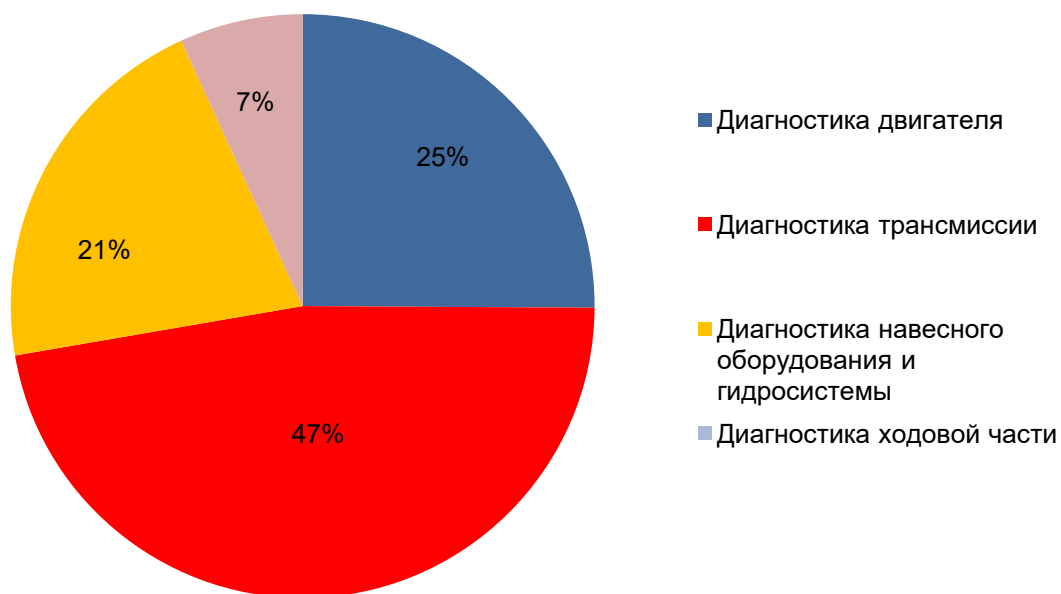


Рисунок 1 – Трудоемкость диагностических операций при проведении технического обслуживания ТО-3 бульдозера марки Коматцу Д-355А
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The rate of diagnostics operations during MS-3 for Komatsu D-355A bulldozer
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Трудоемкость, затрачиваемая на диагностические операции двигателя силовой установки при проведении ТО-3 бульдозера марки Коматцу Д-355А
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Labor intensity for diagnostics operations of the power plant engine during MS-3, Komatsu D-355A bulldozer
 Source: compiled by the authors.

Трудоемкость измерения абсолютной компрессии значительно превышает трудозатраты при измерении относительной компрессии (ОК).

Поэтому с целью снижения трудоемкости авторы предлагают усовершенствовать тест относительной компрессии, который в несколько раз менее трудоемкий, нежели чем замер абсолютной компрессии.

Несмотря на низкую трудоемкость измерения относительной компрессии, данный метод имеет ряд недостатков:

- а) влияние степени разряженности АКБ на точность измерений;
- б) измеряется только разница относительной компрессии между цилиндрами;
- в) влияние технического состояния стартера (износ щеток, снижение мощности).

В числе прочих существенным недостатком метода ОК является нестабильность данного параметра при различных температурах ДДСУ, технического состояния его механизмов.

Авторами статьи осуществлялись неоднократные выезды к строительной технике с целью проведения технического диагностирования дизельного двигателя силовой установки, часть из которых проводилась в условиях низких температур. Результаты технического диагностирования показали, что наблюдается несоответствие между значениями величины потребляемого тока, полученными при положительных и отрицательных температурах окружающей среды. То есть значения величины потребляемого тока при прокручивании коленчатого вала стартером на пусковой частоте вращения при отрицательных температурах показывает повышенное значение, отличное от полученных при положительных температурах с одинаковой наработкой.

Согласно сведениям из отечественных источников исследования величины потребляемого тока проведены только для положительных температур (от 40 до 90 градусов Цельсия). Для обеспечения условий проведения диагностики необходимо прогревать двигатель силовой установки, что повышает простои в ее ожидании. На объектах строительства при отрицательных температурах обеспечить такие условия становится еще более трудоемкой задачей, так как создается дополнительная нагрузка на ремонтный персонал. В условиях Крайнего Севера имеется опыт, когда техника длительное время не глушится, это приводит

к ускоренному снижению ресурса дизельного двигателя силовой установки.

Нестабильность, неоднозначность изучаемого параметра вызвана повышенным сопротивлением сжатию воздуха, из-за изменения его свойств, воздействия отрицательных температур. Как показали испытания, величина потребляемого тока стартером при разных условиях измерений ведет себя нестабильно. Для введения поправочного коэффициента с учетом низких температур необходимо получить зависимость величины потребляемого тока стартером от параметра, который бы позволял обеспечить требуемую точность, стабильность, однозначность, чувствительность, его изменения от температуры ДДСУ.

Помимо этого техника часто находится в различном тепловом состоянии, например в процессе разогрева, прогрева. Температуру окружающей среды можно использовать как параметр, относительно которого можно будет проводить корректировку величины потребляемого тока. Температура окружающей среды могла бы обеспечить необходимую стабильность исследуемого диагностического параметра, но только при условии, когда температура ДДСУ ей соответствует. В настоящее время ведутся исследования, оценивающие влияние температуры окружающей среды на величину потребляемого тока стартером.

Дополнительно авторами было предложено исследовать зависимости величины потребляемого тока дизельного двигателя силовой установки бульдозера от следующих параметров: скорость приращения давления моторного масла, температура охлаждающей жидкости.

Анализ работ, посвященных применению метода относительной компрессии, показал, что ряд авторов предлагают методику технического диагностирования герметичности надпоршневого пространства, основанную на измерении величины потребляемого тока стартером при холодной пусковой прокрутке коленчатого вала [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Другими авторами был предложен совершенно иной метод оценки технического состояния двигателя, основывающийся на сравнении фактического значения величины потребляемого тока с эталонным [9, 10, 11].

В диссертационной работе Т.И. Кривцовой проведены исследования, доказывающие корреляцию между параметрами: герметичность

надпоршневого пространства и величина потребляемого тока, при температуре моторного масла 40–90 градусов Цельсия и заряде аккумуляторной батареи не менее 50%¹.

Авторами статьи была выдвинута гипотеза о том, что косвенными параметрами, отображающими свойства воздушного заряда, могут являться скорость приращения давления моторного масла и температура охлаждающей жидкости.

Цель исследования – получение зависимостей величины размаха сигнала потребляемого тока стартером от скорости приращения давления моторного масла, температуры охлаждающей жидкости двигателя силовой установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования в течение пяти лет являлся бульдозер Shantui SD 22, оснащенный дизельным четырёхтактным 6-ци-

линдровым, однорядным двигателем силовой установки с турбонаддувом фирмы Cummins модель NT855-C280S10 (рисунок 3) с жидкостным охлаждением, период наработки техники составляет 5125–9179 моточасов.

Для проведения эксперимента использовалось следующее диагностическое оборудование: мотортестер марки USB Autoscope версия 3, токовые клещи, работающие в диапазоне от 0 до 600 А, ноутбук с установленным программным обеспечением, устройство для измерения параметров электросети марки Ablogger версия V2.1, пирометр (для измерения температуры охлаждающей жидкости и моторного масла), видео/фотокамера смартфона Xiaomi Redmi 9.

Для подтверждения вышеописанных гипотез были проведены два эксперимента в холодное время года при температуре окружающей среды -17 и -21 градусов Цельсия с интервалом в один год при наработке соответственно 9000 и 9178 моточасов.



Рисунок 3 – Бульдозер Shantui SD 22
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Shantui SD22 Bulldozer
Source: compiled by the authors.

¹ Кривцова Т.И. Совершенствование метода диагностирования компрессионных свойств дизельных двигателей тракторов и автомобилей сельскохозяйственного назначения по характеристикам стартерного тока: автореф. дисс. канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2011. 20 с.

Первый эксперимент проводился при температуре окружающего воздуха -17 градусов Цельсия с целью определения влияния скорости приращения моторного масла в системе смазки на величину потребляемого тока. Суть эксперимента заключалась в том, что на холодном двигателе силовой установки бульдозера Shantui SD 22 при прокручивании коленчатого вала стартером (частота вращения коленчатого вала составляла около 170 об/мин) фиксировались показания величины потребляемого тока. Затем проводилось измерение температуры моторного масла в области картера. В процессе прокручивания коленчатого вала фиксировалось время, за которое давление в системе смазки достигало установленного значения (0,25 МПа). Показания давления в системе смазки фиксировались с помощью штатного датчика. После проведения вышеописанных операций осуществлялся запуск двигателя и прогрев моторного масла в течение 5–10 мин. Затем повторно проводились вышеописанные операции. Показания времени и давления в системе смазки необходимы для расчета скорости приращения давления моторного масла. Экспериментальные данные и результаты расчета по формуле (1) представлены в следующем разделе.

Через год проводился второй эксперимент при температуре окружающего воздуха - 21 градус Цельсия с целью определения зависимости величины потребляемого тока от температуры охлаждающей жидкости. Суть эксперимента заключалась в том, что на холодном двигателе силовой установки бульдозера SHANTUI SD 22 осуществлялось прокручивание коленчатого вала стартером (частота вращения коленчатого вала составляла около 170 об/мин). Затем с помощью подогревателя охлаждающей жидкости осуществлялся ее нагрев. Через каждые 5 градусов Цельсия при помощи пирометра фиксировались показания температуры ОЖ в области термостата (рисунок 4). Далее осуществлялось прокручивание

коленчатого вала стартером, величина потребляемого тока фиксировалась прибором марки Ablogger версия V2.1. Монтаж устройства Ablogger версия V2.1 проводился на плюсовой провод аккумулятора (рисунок 5), из-за отсутствия технической возможности, связанной с влиянием низких температур на состояние аккумуляторных батарей ноутбуков с программным обеспечением.

Авторами было принято решение о применении прибора марки Ablogger версия V2.1 в качестве аналога токовых клещей, в связи с тем, что он обладает возможностью измерения и записи сигналов при -20 градусах Цельсия. Показания прибора и токовых клещей являются полностью идентичными.

Полученные результаты измерения величины потребляемого тока от температуры охлаждающей жидкости представлены в следующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам анализа полученных данных первого эксперимента была предложена формула (1) для расчета скорости приращения давления моторного масла:

$$v_m = \frac{\Delta P}{(t_k - t_n) \cdot n_{cp}}, \quad (1)$$

где v_m – скорость приращения давления моторного масла, МПа/об;

ΔP – установленное значение давления моторного масла, МПа;

t_k – конечное значение времени, с;

t_n – начальное значение времени, с;

n_{cp} – среднее значение частоты вращения коленчатого вала, об/мин.

На основании предложенной формулы были проведены расчеты и построены графические и аналитические зависимости, характеризующие изменение величины размаха потребляемого тока от скорости приращения давления моторного масла.



Рисунок 4 – Измерение температуры ОЖ в области термостата
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Measurement of coolant temperature in the thermostat area
Source: compiled by the authors.



Рисунок 5 – Место монтажа устройства марки Ablogger V2.1
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Installation location of the Ablogger V2.1 device
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
 Результаты измерения величины размаха потребляемого тока
 от скорости приращения давления моторного масла
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 Measurement results for the magnitude of the consumed current change
 depending on the increase in engine oil pressure
 Source: compiled by the authors.

Средняя частота вращения коленчатого вала, об/мин	Температура картера двигателя, °С	Продолжительность нарастания давления до установленного значения, сек	Давление в системе смазки, МПа	Верхнее значение сигнала, А	Нижнее значение сигнала, А	Размах сигнала, А
142	-17	4	0,25	575	429	146
155	-5	4	0,25	500	375	125
167	-1	4	0,25	418	310	108
174	6	3	0,25	365	269	96
202	27	3	0,25	359	265	94

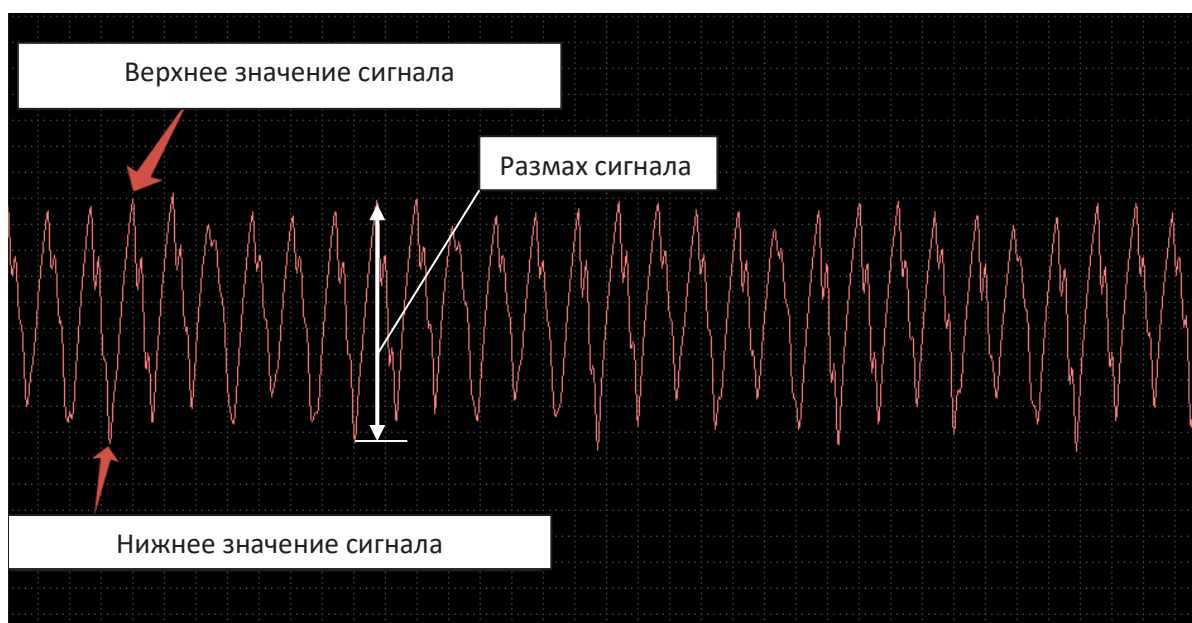


Рисунок 6 – Осциллограмма потребляемого тока стартером с параметрами сигнала
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Oscillogram of the current consumed by the starter with signal parameters
 Source: compiled by the authors.

В результате подстановки данных первого эксперимента в формулу (1) были получены значения скорости приращения давления моторного масла (таблица 1).

Под размахом понимается разность между максимальным и минимальным значениями сигнала величины потребляемого тока стартером (рисунок 6).

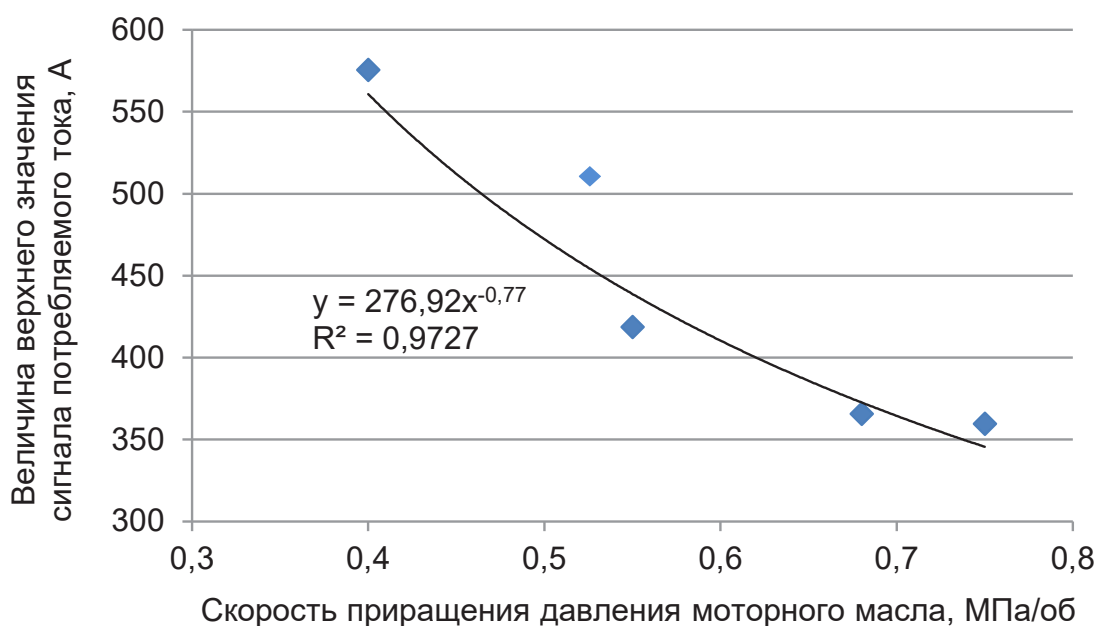


Рисунок 7 – Зависимость изменения величины верхнего значения сигнала тока от скорости приращения давления моторного масла
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Relation between the maximum current signal amplitude and the rate of increase in engine oil pressure
Source: compiled by the authors.

Затем была построена графическая и получена аналитическая зависимости верхнего значения величины потребляемого тока от скорости приращения давления моторного масла, приведенные на рисунке 7 и в формуле (2).

$$I = 276,9 \cdot v_M^{-0,77}, \quad (2)$$

где I – величина потребляемого тока, А;
 v_M – скорость приращения давления моторного масла, МПа/об.

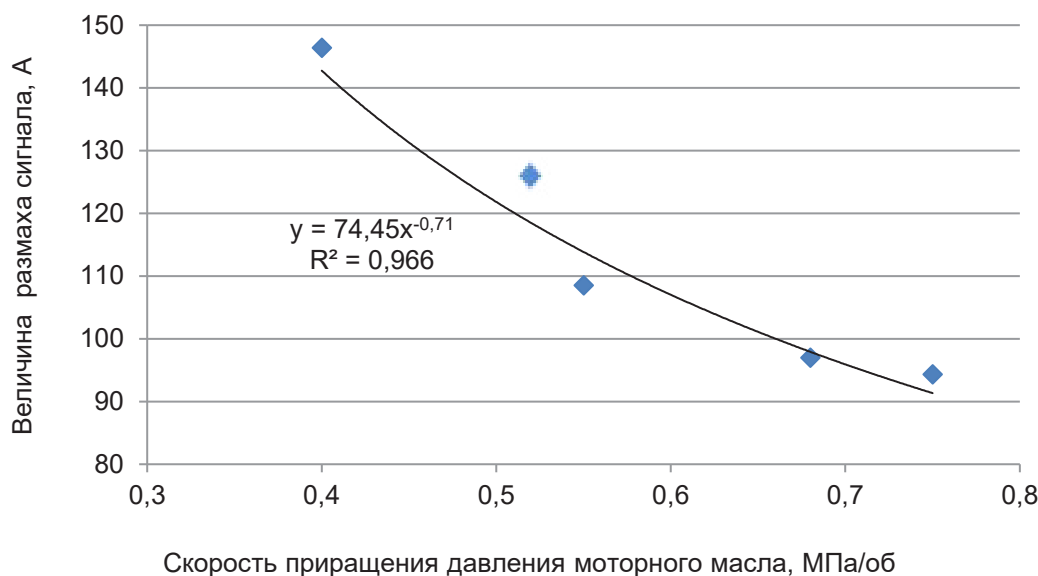


Рисунок 8 – Зависимость изменения размаха сигнала от скорости приращения давления моторного масла
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Relation between changes in the signal range and the rate of increase in engine oil pressure
Source: compiled by the authors.

По результатам первого эксперимента также были получены графическая и аналитическая зависимости величины размаха сигнала от скорости приращения давления моторного масла, приведенные на рисунке 8 и в формуле (3).

$$\Delta = 74,45 \cdot v_M^{-0,71}, \quad (3)$$

где Δ – величина размаха сигнала, А;

v_M – скорость приращения давления моторного масла, МПа/об.

Факторами, влияющими на снижение скорости приращения давления моторного масла в системе смазки ДДСУ, являются следующие:

- износ масляного насоса;
- неисправность редукционного клапана;

- увеличенный зазор в кривошипно-шатунном механизме (КШМ);

- повышение вязкости моторного масла, приводящего к возрастанию момента сопротивления при прокручивании коленчатого вала стартером.

Учитывая тот факт, что по мере прогревания ДДСУ продолжительность нарастания давления до установленного значения моторного масла уменьшается, а скорость приращения давления моторного масла увеличивается, авторы пришли к выводу о том, что причиной низкой скорости приращения давления моторного масла при прокручивании коленчатого вала стартером является его повышенная вязкость.

Таблица 2
 Результаты измерения величины потребляемого тока от температуры охлаждающей жидкости
 Источник: составлено авторами.

Table 2
 Measurement results for the current consumption and the coolant temperature
 Source: compiled by the authors.

Температура охлаждающей жидкости, °С	Верхнее значение сигнала, А	Нижнее значение сигнала, А	Размах сигнала, А
-21	658	445	213
-19	600	400	200
12	600	415	185
13	590	415	175
18	590	415	175
25	590	410	180
30	560	375	185

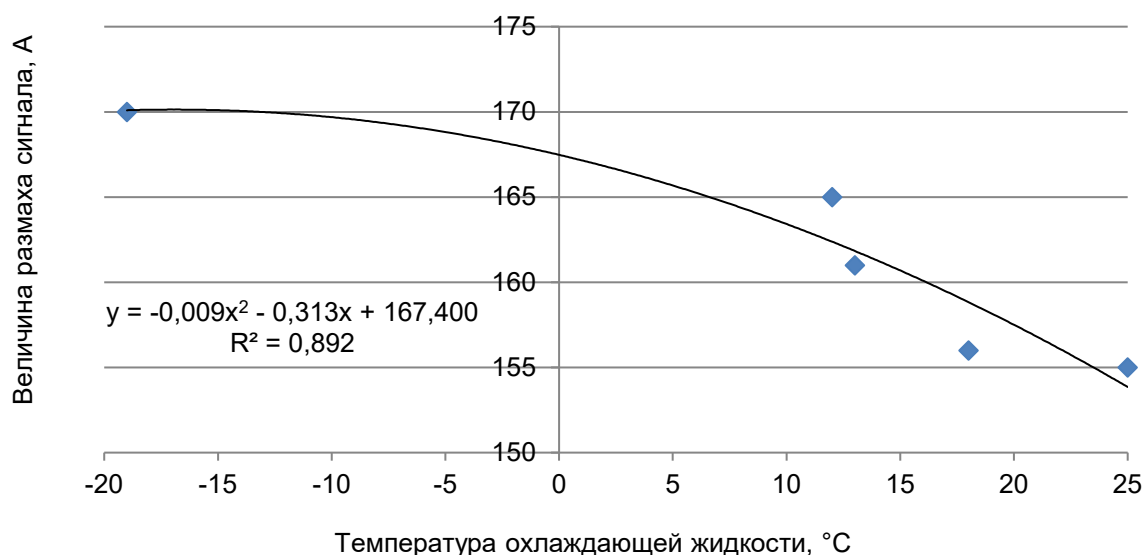


Рисунок 9 – Зависимость изменения размаха сигнала от температуры охлаждающей жидкости
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Relation between the change in the signal range and the coolant temperature
 Source: compiled by the authors.

Полученные результаты испытаний второго эксперимента, характеризующие изменения величины потребляемого тока от температуры охлаждающей жидкости, представлены в таблице 2.

По результатам испытаний второго эксперимента были получены графическая и аналитическая зависимости величины размаха сигнала от температуры охлаждающей жидкости, приведенные на рисунке 9 и в формуле (4).

$$\Delta = -0,009 \cdot t^2 - 0,313 \cdot t + 167,400, \quad (4)$$

где Δ – величина размаха сигнала, А;
 t – температура охлаждающей жидкости, °С.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что величина размаха сигнала потребляемого тока двигателем силовой установки снижается с увеличением скорости приращения давления моторного масла и температуры охлаждающей жидкости.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение функциональных возможностей применения метода относительной компрессии позволяет сократить трудоемкость диагностических операций ТО-3 бульдозера марки Коматцу Д-355А на 8%, отдельно ДДСУ – на 24%.

Сокращение трудоемкости проведения диагностики ДДСУ обусловлено значительным уменьшением времени при измерении компрессии. Трудоемкость измерения компрессии традиционными методами (компрессометр/компрессограф) составляет 43% от общей трудоемкости диагностики ДДСУ. При измерении методом ОК трудоемкость оценки герметичности надпоршневого пространства снижается на 58,5 %. Следовательно, применение метода ОК позволит в значительной степени автоматизировать процесс измерения компрессии, тем самым снизить трудоемкость при проведении ТО-3 бульдозера.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что при одинаковой температуре окружающей среды значения величины потребляемого тока при прокручивании коленчатого вала стартером холодного ДДСУ отличаются (см. таблицы 1, 2). Эти отличия могут быть вызваны изменением вязкости моторного масла (повышение или снижение), ухудшением технического состояния механизмов ДДСУ (увеличение зазоров в КШМ, в масляном насосе, неисправность редукционного клапана). При повышении температуры моторного масла значительно меняется пусковая частота вращения коленчатого вала. Температура охлаждающей жидкости не учитывает влияния вышеперечисленных факторов, и поэтому зависимость величины потребляемого тока от данного параметра будет обладать значительной погрешностью.

При одной и той же температуре моторного масла и охлаждающей жидкости наблюдаются разные значения размахов сигналов потребляемого тока. Это объясняется разными условиями проведения испытаний.

По мнению авторов, параметр «скорость приращения давления моторного масла» позволяет учитывать влияние вышеперечисленных факторов. Тем самым применение полученных зависимостей (см. рисунки 7, 8; формулы (2), (3)) позволят более точно осуществлять корректирование величины потребляемого тока для оценки технического состояния герметичности надпоршневого пространства ДДСУ.

Применение полученных результатов исследований повысят заданную точность измерений, сократят трудоемкость, продолжительность технического диагностирования дизельного двигателя силовой установки строительных машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нечаев В.В., Головкин К.В., Тарасенко А.А., Носков С.В. Результаты исследования метода диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3.
2. Павлов Д.В. Пуск дизельного двигателя 149,5/8,0 путем принудительной подачи предварительно разогретого воздушного заряда // Известие высших учебных заведений. Машиностроение: 2022. № 3(744): 53–59. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-3-53-59>
3. Бондарь В.Н. Математическая модель рабочего процесса дизельного двигателя на режимах пуска // Вестник СибАДИ. 2016. Вып. 1 (47). С. 81–86.
4. Нечаев В.В., Воробьев Е.В., Тарасенко А.А. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала // Инженерный вестник Дона. № 3. 2018.
5. Елагин М.Ю., Павлов Д.В., Хмелев Р.Н. Разработка и апробация математической модели режима работы дизеля при низких температурах окружающей среды // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 2(44): 78–84 <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-78-84>
6. Картуков А.Г., Нечаев В.В. Методика определения разброса компрессии в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания при прокрутке коленчатого вала // Двигателестроение. 2017. № 1. С. 31–35.
7. Павлов Д.В., Платонов К.Ю., Хмелев Р.Н. Математическое моделирование процесса функционирования одноцилиндрового дизеля с воздушного охлаждения с учетом расхода картерных газов // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 3(45). С. 75–82. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-45-3-75-82>
8. Бабошин А.А., Косарев А.С., Малышев В.С. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя // Вестник МГТУ. Т. 16, № 1. 2013. С. 33–39.
9. Agureev I.E., Elagin M.Yu., Pavlov D.V., Khmelev R.N. Studies of the process of heating air in the inlet pipe for starting diesel engine at low temperatures. // ICMTMTE 2020: BRISTOL.– ENGLAND. 2020. С 42 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042028>
10. Пегачков А.А., Кузовков И.М. Удаленная диагностика тепловых параметров двигателя внутреннего сгорания // Высокие технологии в строительном комплексе. 2020. № 1 С. 204–210.
11. Зорин В.А., Рузанов Е.В., Пегачков А.А. Прогнозирование надежности дорожной и строительной с применением универсальных бортовых контроллеров // Техника и технологии транспорта. 2019. № 13. С.50.

12. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д. Результаты экспериментального исследования метода диагностики двигателя на основе анализа бокового ускорения блока двигателя: материалы 116-й Международной научно-технической конференции ААИ. Улан-Удэ, 2023. С. 93–98.
13. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д., Кочетков С.П., Яковчук П.С. Методика диагностирования автомобильного двигателя по балансировке цилиндров в режиме холостого хода: сборник научных трудов по материалам 80-й Научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ / под общ. ред. А. А. Солнцева. Москва, 2022. С. 139–145.
14. Грунин К.Е., Гоева В.В., Гришин Н.Е. Совершенствование диагностирования автотракторных двигателей пневмотестированием // Естественные и технические науки. 2022. № 10(173). С. 182–192.
15. Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Деньгин И.Д. Влияние технического состояния дизельного двигателя на изменения давления в цилиндре // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 25-летию Института транспорта, Тюмень, 11–12 апреля 2024 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. С. 163–167.
16. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д. Прибор для диагностирования дизельных двигателей по параметрам балансировки на холостом ходу. Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК: материалы X Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Терских Ивана Петровича, Молодёжный, 06–08 октября 2022 года / Редколлегия: Н.Н. Дмитриев [и др.]. Молодёжный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2022. С. 15–22.
17. Яковчук П.С., Кривцов С.Н. Алгоритм диагностирования дизельных двигателей автомобилей по показаниям датчика массового расхода воздуха // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 124-й Международной научно-технической конференции, Иркутск, 17–19 сентября 2025 года. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет.
18. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д., Данилов В.А. [и др.] Результаты экспериментального исследования по определению влияния момента зажигания и впрыска, а также работоспособности цилиндров автомобильного двигателя на величину боковых ускорений блока цилиндров // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 157–164. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-157-164>
19. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д. Результаты экспериментального исследования метода диагностики двигателя на основе анализа бокового ускорения блока двигателя // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 116-й Международной научно-технической конференции, Улан-Удэ, 12–13 сентября 2023 года. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2023. С. 93–98. https://doi.org/10.53980/9785907746091_93
20. Медведев А.А. Оптимизация пусковых процессов дизельных двигателей // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов: сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 22–23 мая 2024 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 198–202.
21. Афанасьев А.С., Гайдашов Ю.А., Марченко М.А. Диагностирование дизелей по параметрам сопутствующих процессов в режиме компрессорного цикла. СПб.: В сборнике «Инновации на транспорте и в машиностроении»: сборник трудов III Международной научно-технической конференции: в 5 томах; под ред. В.В. Максарова. 2015. С. 9–12.
22. Кузнецов Н.В. Безразборная экспресс-диагностика для определения неисправности компрессии в цилиндрах двигателя: материалы XX Международной научно-практической конференции «Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике» (г. Кемерово 8-9 декабря 2021 года) / под ред. кол. Е.А. Ижмулкина [и др.]; ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА. Кемерово, 2021 г. С. 136 – 139.
23. Попов А.Ю. Диагностика и анализ графиков давления цилиндров двигателя: материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика» (12 февраля 2021 г.) / под ред. А.И. Вострецова; Научно-издательский центр «Мир науки».

REFERENCES

1. Nechaev V.V., Golovko K.V., Tarasenko A.A., Noskov S.V. Results of a study of the method of diagnosing the cylinder piston group of an engine. *Engineering Bulletin of the Don*. No. 3. 2018. (in Russ.)
2. Pavlov D.V. Starting a 1H9.5/8.0 diesel engine by forcing a preheated air charge. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering: 2022*; №3(744): 53-59 (in Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-3-53-59>
3. Bondar V.N. Mathematical model of the working process of a diesel engine in start-up modes. *SibADI Bulletin*, 2016; issue 1 (47), pp. 81-86. (in Russ.)
4. Nechaev V.V., Vorobyov E.V., Tarasenko A.A. Methods of technical diagnostics of the cylinder piston group of diesel engines by cold cranking. *Engineering Bulletin of the Don*. No. 3. 2018. (in Russ.)
5. Elagin M.Y., Pavlov D.V., Khmelev R.N. Development and testing of a mathematical model of diesel engine operation at low ambient temperatures. *Izvestiya MGTU MAMI*: 2020; №2(44). Pp. 78-84 (in Russ.) <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-78-84>

6. Kartukov A.G., Nechaev V.V. Methodology for determining the compression spread in internal combustion engine cylinders when scrolling the crankshaft. *Engine engineering*. 2017; No. 1. pp. 31-35. (in Russ.)
7. Pavlov D.V., Platonov K.Yu., Khmelev R.N. Mathematical modeling of the operation of a single-cylinder diesel engine with air cooling, taking into account the consumption of crankcase gases. *Izvestia of the Moscow State Technical University of MAMI*: 2020; №3(45): 75-82. (in Russ.) <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-45-3-75-82>
8. Baboshin A.A., Kosarev A.S., Malyshev V.S. Assessment of the technical condition of internal combustion engines by the current consumed by the starter when the engine is running. *Bulletin of the Moscow State Technical University*. Volume 16. No. 1. 2013; pp. 33-39. (in Russ.)
9. Agureev I.E., Elagin M.Yu., Pavlov D.V., Khmelev R.N. Studies of the process of heating air in the inlet pipe for starting diesel engine at low temperatures. ICMTMTE 2020: BRISTOL. ENGLAND.2020. With 42. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042028>
10. Pegachkov A.A., Kuzovkov I.M. Remote diagnostics of thermal parameters of an internal combustion engine. *High technologies in the construction complex*. 2020; No. 1, pp. 204-210. (in Russ.)
11. Zorin V.A., Ruzanov E.V., Pegachkov A.A., Forecasting the reliability of road and construction using universal on-board controllers. *Engineering and technology of transport*. 2019; No. 13. p.50. (in Russ.)
12. Krivtsov S.N., Den'gin D.I. Results of an experimental study of an engine diagnostic method based on analysis of lateral acceleration of the engine block. Proceedings of the 116th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers (AAI). UlanUde, 2023; P. 93–98. (in Russ.)
13. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S., Den'gin D.I., Kochetkov S.P. Method for diagnosing an automobile engine via cylinder balancing in idle model. Collection of scientific papers based on the materials of the 80th ScientificMethodological and Research Conference of MADi / Ed. By A.A. Solntsev. Moscow, 2022; P.139–145. (in Russ.)
14. Grunin K.E., Goeva V.V., Grishin N.E. Improving diagnostics of automotive and tractor engines using pneumatic testing. *Natural and Technical Sciences*. 2022; No. 10(173). P. 182–192. (in Russ.)
15. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S., Den'gin I.D. Influence of the technical condition of a diesel engine on changes in cylinder pressure. Transport and TransportTechnological Systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Transport, Tyumen: Tyumen Industrial University, 2024; P. 163–167. (in Russ.)
16. Krivtsov S.N., Den'gin I.D. Device for diagnosing diesel engines based on balancing parameters at idle. Current issues of Engineering and Technological Support for the AgroIndustrial Complex: Proceedings of the X National Scientific and Practical Conference with International Participation dedicated to the 90th anniversary of Honored Scientist and Engineer of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor Ivan Petrovich Terskikh, Molodezhny, October 06–08, 2022 /Editorial Board: N.N. Dmitriev et al. Molodezhny: Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky, 2022; P. 15–22. (in Russ.)
17. Yakovchuk P.S., Krivtsov S.N. Algorithm for diagnosing diesel car engines based on mass air flow sensor readings // Safety of Wheeled Vehicles in Operation: Proceedings of the 124th International Scientific and Technical Conference, Irkutsk, September 17–19, 2025. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. (in Russ.)
18. Krivtsov S.N., Den'gin I.D., Danilov V.A. Results of an experimental study to determine the influence of ignition and injection timing, as well as cylinder performance of an automobile engine, on the magnitude of lateral accelerations of the cylinder block. *Mechatronics, Automation and Robotics*. 2024; No. 13. P. 157–164. (in Russ.) <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-157-164>
19. Krivtsov S.N., Den'gin I.D. Results of an experimental study of an engine diagnostic method based on analysis of lateral acceleration of the engine block. Safety of Wheeled Vehicles in Operation: Proceedings of the 116th International Scientific and Technical Conference, UlanUde. September 12-13, 2023. UlanUde: East Siberian State University of Technology and Management, 2023. P. 93–98. (in Russ.) https://doi.org/10.53980/9785907746091_93
20. Medvedev A.A. Optimization of the Starting Processes of Diesel Engines. Increasing the Managerial, Economic, Social, and Innovative-Technical Potential of Enterprises, Industries, and National Economic Complexes: Collection of Articles from the XV International Scientific and Practical Conference, Penza, May 22–23, 2024. Penza: Penza State Agrarian University, 2024. Pp. 198-202. (in Russ.)
21. Afanasyev A.S., Gaidashov Yu.A., Marchenko M.A. Diagnostics of diesel engines by parameters of accompanying processes in the mode of the compressor cycle. SPb.: In the collection "Innovations in transport and mechanical engineering": collection of works of the III International scientific and technical conference: in 5 volumes; under the editorship of V.V. Maksarov. 2015. Pp. 9–12.
22. Kuznetsov N.V. Disassembled express diagnostics for determining compression malfunction in engine cylinders: materials of the XX International Scientific and Practical Conference "Modern Trends of Agricultural Production in the Global Economy" (Kemerovo, December 8-9, 2021) / edited by E.A. Izhmulkina [et al.]; Kuzbass State Agricultural Academy. Kemerovo, 2021, pp. 136-139.
23. Popov, A.Yu. Diagnostics and Analysis of Engine Cylinder Pressure Graphs: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Scientific Research: Theory, Methodology, and Practice" (February 12, 2021) / edited by A.I. Vostretsov; Scientific and Publishing Center

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Салихов Р.Ф. Разработка и анализ экспериментальных данных.

Шутанов И.А. Проведение обзора. Получение экспериментальных данных.

Дубков В.В. Получение экспериментальных данных.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Salikhov R.F. Experiment design and analysis of the experimental data.

Shutanov I.A. Literature review, obtaining the experimental data.

Dubkov V.V. Obtaining the experimental data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салихов Ринат Фокилевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), заведующий научно-исследовательской лабораторией «Центр экспертиз и диагностики машин» (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>,

SPIN-код: 3196-9174,

e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Шутанов Иван Александрович – аспирант Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

e-mail: temamontana97@mail.ru

Дубков Валерий Витальевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2480-7795>

SPIN-код: 3196-9174,

e-mail: dubkovvv.74@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salikhov Rinat F. – Cand. of Technical Science, Associate Professor at the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), the chief of the Center for Expertise and Diagnostics of Machines (5, pr. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>,

SPIN-code: 3196-9174,

e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Shutanov Ivan Al. - postgraduate student at the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, pr. Mira, Omsk, 644050).

e-mail: temamontana97@mail.ru

Dubkov Valery V. – Cand. of Technical Science, Associate Professor at the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), the chief of the Center for Expertise and Diagnostics of Machines (5, pr. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2480-7795>

SPIN-код: 3196-9174,

e-mail: dubkovvv.74@mail.ru

Научная статья
УДК 625.08:519.876.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>
EDN: YCKMUF



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ВЕДУЩИХ КОЛЕСАХ ГУСЕНИЧНОГО БУЛЬДОЗЕРА

И.В. Лесковец¹ ✉, А.А. Грачев²

¹Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
leskovets1966@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье отмечается, что при проведении прочностных расчетов сборочных единиц и деталей бульдозеров, в том числе ведущих колес, используются коэффициенты динамичности. Анализ результатов исследований других авторов показывает, что изучение динамических процессов, проходящих во время движения гусеничных машин разного назначения, вызывает большой интерес.

Материалы и методы. Для анализа динамических нагрузок на ведущие колеса во время копания грунта авторами предлагается использовать динамическую, математическую и имитационную модели бульдозера, разработанные на основе системного подхода, включающие двигатель трансмиссию, движитель рабочего оборудования, внешнюю среду. С использованием программного обеспечения, разработанного на основе математических моделей и позволяющего имитировать движение бульдозера, заглупление отвала, увеличение толщины стружки, рост призмы волочения, транспортировку грунта, проведен ряд численных экспериментов, имитирующих движение машины в режиме копания грунта с разными толщинами стружки.

Результаты. Результаты имитационных экспериментов, моделирующих процесс копания с разными толщинами стружки, показывают, что значения коэффициентов динамичности достигают 20% при меньших толщинах стружки и, соответственно, более низком уровне нагружения по сравнению с более высокими толщинами стружки, когда значения коэффициентов динамичности не превышают трех процентов при более высоком уровне нагружения.

Обсуждение и заключение. Таким образом, при прочностных расчетах ведущих колес гусеничного движителя бульдозера и максимальных нагрузках на рабочем оборудовании использование коэффициентов динамичности не требуется в связи с тем, что расчеты на прочность предполагают использование коэффициентов запаса, которые составляют около 20% от статических нагрузок. Необоснованное использование высоких значений коэффициентов динамичности приводит к увеличению металлоемкости конструкций, и, соответственно, увеличиваются стоимость проектируемой техники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бульдозер, гусеничный движитель, динамические нагрузки, математическая модель, имитационная модель

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Все 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: Лесковец И.В., Грачев А.А. Имитационная модель формирования нагрузок на ведущих колесах гусеничного бульдозера // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 28-39. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>

© Лесковец И.В., Грачев А.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>
EDN: YCKMUF

SIMULATION MODEL OF THE FORMATION OF LOADS ON THE DRIVING WHEELS OF A TRACKED BULLDOZER

Igor' V. Leskovets¹ ✉, Aleksey A. Grachev²

Interstate Educational Institution of Higher Education

¹«Belarusian-Russian University»,

Mogilev, Republic of Belarus

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author

leskovets1966@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The scientific article notes that dynamic coefficients are used for strength calculations of bulldozer units and parts, including the driving wheels. The analysis of the research results shows that the studying of dynamic processes appearing during the movement of various types of tracked vehicles evokes great interest.

Materials and Methods. To analyze the dynamic loads on the driving wheels during cutting and pushing soil, the authors proposed to use dynamic, mathematical, and simulation models of bulldozer. They are based on a comprehensive systemic approach and include the engine, transmission, tracks, working equipment, and the external environment. Using specialized software based on mathematical models and capable to simulate bulldozer movement, blade penetration, chip thickness increase, drag prism growth, and soil transportation, a series of numerical experiments have been conducted simulating the machine operation while moving soil with varying chip thickness.

Results. The results of simulation experiments modeling the cutting and pushing soil process with different chip thickness show that working with a smaller chip thickness (which implies a relatively low load level), the coefficients of dynamism reach significant values - up to 20%. Conversely, when working with a larger chip thickness and, accordingly, under a high load level, the values of these coefficients are insignificant - no more than 3%.

Discussions and Conclusions. Therefore, performing strength calculations for driving wheels of bulldozer caterpillar tracks and maximum loads on the working equipment, the use of dynamic factors is not needed, as strength calculations include safety factors that make approximately 20% of the static loads. Unjustified use of high dynamic coefficients leads to the increase in the metal consumption of the structure, and, as a result, to the increase in the cost of the designed equipment.

KEYWORDS: bulldozer, tracks, dynamic loads, mathematical model, simulation model

The article was submitted: November 27, 2025; approved after reviewing: December 16, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Leskovets I.V., Grachev A.A. Simulation model of the formation of loads on the driving wheels of a tracked bulldozer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 28-39. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>

© Leskovets Igor' V., Grachev Aleksey A., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование гусеничных бульдозеров было и остается сложной технической задачей. Обеспечение необходимой силы тяги по движителю и по двигателю требуется для реализации мощности двигателя в полном объеме при проведении земляных работ. Реализация требуемой силы тяги обеспечивается ведущими колесами, которые испытывают значительные нагрузки. Определение статических моментов на колесах производится на основании известных методик и не представляет сложности. Как правило, при применении статических зависимостей в динамических расчетах используют коэффициенты динамичности. При движении гусеничного бульдозера различные детали и механизмы гусеничного обвода испытывают разные динамические нагрузки. Значения коэффициентов динамичности для разных частей гусеничного движителя могут иметь разные величины и требуют обоснования.

Исследования в данной области проводятся многими учеными в разных организациях, что говорит об их важности и актуальности. Автором фундаментального учебника¹ рассматриваются основы динамики гусеничных машин, представлены ключевые теории взаимодействия движителя с грунтом, включая методику для расчета тяги и сопротивления качению. Для многих исследований это издание является основой для формирования новых научных подходов.

Авторами [1] проведены расчетно-экспериментальные исследования, которые позволили установить особенности динамических процессов в гусеничном движителе, выявить основные закономерности процесса формирования поперечных колебаний, их зависимости от конструктивных параметров обвода и различных эксплуатационных факторов.

Авторами [2] представлено исследование, посвященное совершенствованию математической модели динамики гусеничного движителя специальной машины. Особенностью исследования является учет реального разброса технологических параметров и износа элементов гусеницы (звеньев, пальцев, втулок), что делает модель более адекватной реальным эксплуатационным условиям. Практическая ценность работы заключается в том, что она предоставляет инструмент для более точного

прогнозирования нагрузок и оптимизации конструкций гусениц с учетом неизбежных производственных допусков и износа.

В работе [5] проведены исследования наезда первого опорного катка на неровность. Практика исследований показывает, что именно первый каток инициирует силовое воздействие на всю последующую цепь элементов движителя, определяя динамику нагружения. Установлено, что ударное воздействие на первый каток вызывает сложные колебательные процессы в гусеничной цепи и элементах трансмиссии.

Авторами [6] представлено исследование, проведенное с помощью механико-математической модели гусеничного движителя с аналитическим описанием взаимодействия гусеницы с треугольным обводом. Проведенные исследования позволили установить, что динамическое давление и уровень вертикальных колебаний движителя для гусеницы с катками ниже, чем для модели без гусеницы, но выше, чем для движителя с реальной гусеницей.

Значительное количество исследований, проведенных другими авторами в разное время, посвящено динамике гусеничных движителей [7, 8, 9, 10], в том числе динамике взаимодействия гусеничных движителей с опорной поверхностью [11].

Немногие авторы предлагают рассматривать математические модели гусеничных движителей и их частей на основании системного подхода, т.е. во взаимодействии с другими системами и механизмами исследуемых машин и с окружающей средой [10].

Исследование [12] посвящено созданию сложной многомассовой модели гусеничного транспорта для анализа его взаимодействия с микропрофилем опорной поверхности. Авторы используют методы моделирования многомассовых систем для изучения системы «ходовая часть-корпус» и оценки вибрационных нагрузок. Результаты имитационного моделирования позволяют прогнозировать динамику машины и улучшать комфорт и управляемость.

Научное исследование [13] представляет собой комплексное моделирование, охватывающее ряд этапов от создания динамической модели до разработки систем управления машиной. В работе представлена полная нелинейная модель, верифицированная путем имитационных экспериментов, и предложены

¹ Wong, J. Y. 2008. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley.

алгоритмы управления для движения по траектории. Эта работа в целом посвящена изучению связей динамики движения и автоматического управления.

Исследование [14] направлено на разработку модели динамики гусеничной машины с симметричной подвеской, используя сочетание многотельной динамики и метода дискретных элементов. Такой подход позволил учесть взаимодействие гусеницы с грунтом на микроуровне, включая деформацию и проскальзывание. Результаты показали, что симметричная подвеска снижает вибрации и повышает устойчивость движения, особенно на мягких поверхностях.

Работа [15] посвящена реализации методики анализа характеристик гусеничного движителя, на примере представлено создание и анализ модели гусеничного движителя в специализированном программном комплексе RecurDyn. Модель включает детализированное описание контактов между гусеницей, катками и грунтом, что позволило получить характеристики движения гусеничной машины.

Исследование [16] анализирует влияние жесткости гусеничной ленты на общую динамику машины. Авторы сравнивают модели с жесткой и гибкой гусеницей, показывая важность учета ее податливости для точности прогнозирования. Работа подчеркивает необходимость использования усложненных моделей для достоверных результатов.

В работе [2²] рассматривается влияние динамических процессов на характеристики движения беспилотных гусеничных транспортных средств. На работу движителя значительное влияние оказывают окружающая среда в виде

опорной поверхности и в виде разрабатываемого грунта.

Обзорная статья [18] систематизирует различные методологии и подходы к моделированию гусеничных машин. В работе рассматриваются как классические методы, так и современные подходы, включая мягкие вычисления. Источник служит отличной отправной точкой для ознакомления с текущим состоянием дел в области. На формирование законов динамического нагружения оказывают большое влияние характеристики движителя и трансмиссии.

В статье [19] проводится сравнительный анализ различных математических моделей динамики транспортных средств, включая гусеничные машины. Авторы рассматривают линейные и нелинейные модели, оценивают их применимость для симуляций движения по сложным поверхностям и предлагают критерии выбора оптимальной модели для инженерных расчетов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При анализе нагруженности ведущих колес авторами предлагается рассматривать гусеничный бульдозер, как систему «оператор – двигатель – трансмиссия – движитель – опорная поверхность – рабочее оборудование – разрабатываемый грунт».

Рассматриваемая модель ведущего колеса бульдозера представлена для случая, когда это колесо поднято над грунтом и не испытывает нагрузок от опорной поверхности, а нагружается траками, входящими в зацепление с колесом (рисунок 1).

² Лесковец И.В. Имитационное моделирование гусеничного бульдозера. Могилев, 2022.

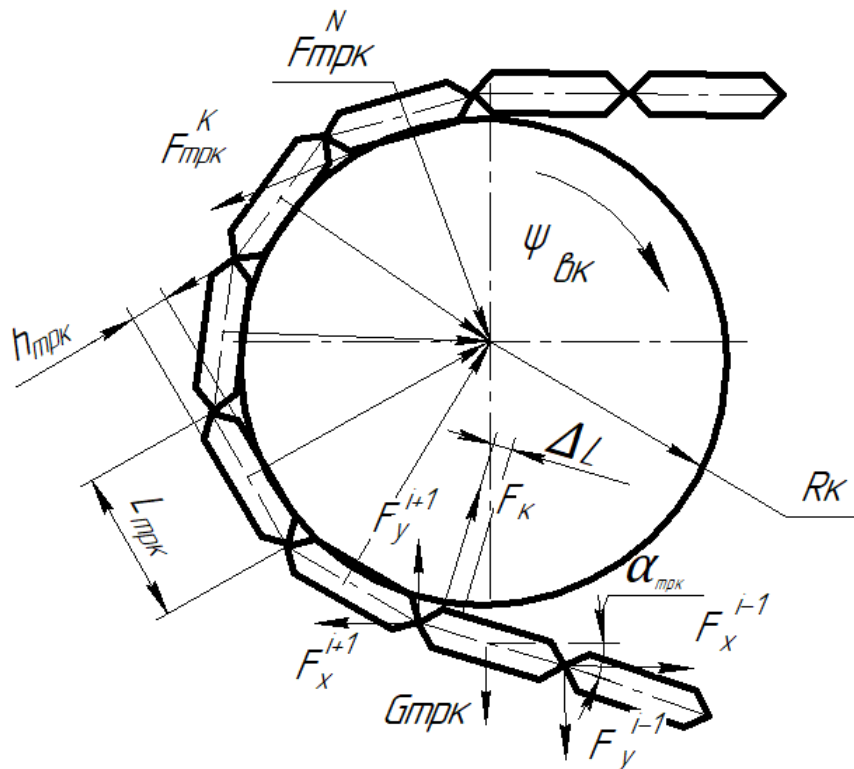


Рисунок 1 – Схема взаимодействия траков с колесом
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The scheme of interaction of the tracks with the wheel
 Source: compiled by the authors.

На ведущее колесо действуют силы от траков, находящихся в зацеплении, входящих в зацепление и выходящих из него, это силы F_{mpk}^N – нормальная и F_{mpk}^K – касательная. На траки, кроме силы взаимодействия с колесом, действуют сила тяжести G_{mpk} , силы взаимодействия с предыдущим траком F_x^{i-1} и F_y^{i-1} и силы взаимодействия с последующим траком F_x^{i+1} и F_y^{i+1} .

По мере продвижения траков вдоль колеса направления и действия сил меняются из-за изменения геометрических координат трака, которые определяются относительно центра тяжести машины в локальных полярных координатах с учетом угла поворота трака вокруг собственного центра тяжести [19].

Математическая модель трака, расположенного на ведущем колесе, представляет собой систему уравнений:

$$\frac{dv_{mpk}^x}{dt} = (F_x^{i-1} - F_x^{i+1} - F_k \cdot \sin(\alpha_{mpk})) / m_{mpk}, \quad (1)$$

$$\frac{dv_{mpk}^y}{dt} = (F_y^{i+1} + F_y^{i-1} - m_{mpk}g + R_k \cos(\alpha_{mpk})) / m_{mpk}, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_{mpk}}{dt} = (F_y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_x^{i+1} \cdot \cos(\alpha_{mpk}) \frac{h_{mpk}}{2} + F_x^{i-1} \cdot \cos(\alpha_{mpk}) \frac{h_{mpk}}{2} - R_k \cdot (L_{mpk} - \Delta L)) / J_{mpk}, \quad (3)$$

где F_x^{i-1} – сила, действующая на рассматриваемый трак со стороны предыдущего трака в направлении оси абсцисс;

F_x^{i+1} – сила, действующая на текущий трак со стороны последующего трака в направлении оси абсцисс;

F_k – касательная сила, действующая на трак со стороны ведущего колеса;

α – угол наклона трака относительно локальной системы координат трака;

m_{mpk} – масса трака;

F_y^{i+1} – сила, действующая на рассматриваемый трак со стороны предыдущего трака в направлении оси ординат;

F_y^{i-1} – сила, действующая на текущий трак со стороны последующего трака в направлении оси ординат;

R_k – нормальная сила, действующая на трак со стороны ведущего колеса;

L_{mpk} – длина трака;

h_{mpk} – высота трака;
 ΔL – расстояние от центра координат трака до точки взаимодействия с колесом;

J_{mpk} – момент инерции трака.
 Каждый трак, который входит в зацепление с ведущим колесом, формирует касательную силу, действующую на колесо. Сумма этих сил создает вращающий момент сопротивления, преодолеваемый моментом, который развивается ДВС, увеличивается в трансмиссии и зависит от мощности двигателя и передаточного числа трансмиссии.

С помощью программного обеспечения, разработанного авторами, проведена серия вычислительных экспериментов, моделирующих движение бульдозера в условиях копания грунта с различными толщинами стружки.

В качестве исследуемого объекта выступает модель гусеничного бульдозера типа «БЕЛАРУС 1502» со следующими основными параметрами:

- масса базовой машины – 13600 кг;
- высота отвала – 1,028 м;
- ширина отвала – 3,63 м;
- двигатель типа Д-260 (максимальный вращающий момент на коленчатом валу 521 Нм при частоте вращения 1500 мин⁻¹;
- общее передаточное число трансмиссии при включенной во время эксперимента передаче 175.

В серии экспериментов использовались параметры грунта, представленные в таблице 1.

Таблица 1
Параметры грунта
 Источник: составлено авторами.

Table 1
Soil parameters
 Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение		
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
Угол внутреннего трения, град	28	28	28
Угол трения грунта по металлу	26	26	26
Угол наклона призмы волочения к горизонту, град	38	38	38
Удельное сцепление грунта ненарушенной структуры, кПа	2	2	2
Удельное сцепление грунта в призме волочения, кПа	0,5	0,5	0,5
Удельное сопротивление резанию, аПа	12	12	12
Плотность грунта на рабочем органе и в призме волочения, т/м ³	1,8	1,8	1,2
Коэффициент жесткости, кПа/м	2000	2000	2000
Толщина стружки, мм	100	150	200

Имитационный эксперимент проведен в следующей последовательности:

- расчет исходных статических данных;
- установка рычага акселератора в положение 80%;
- включение текущей передачи;
- начало динамического расчета, имитирующего начало движения: включение сцепления, разгон до скорости 1 м/с;
- опускание отвала до заданной толщины стружки;
- набор призмы волочения, выглубление отвала для снижения сил сопротивления копанью;

– набор призмы волочения и движение в заданных условиях в течение 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения эксперимента анализировались величины толщины стружки, сил суммарного сопротивления передвижению, моментов на ведущих колесах с целью выявления основных факторов, оказывающих влияние на динамическую составляющую передвижению и определение коэффициента динамичности.

Результаты имитации процесса копания представлены на рисунках 2, 3, 4.

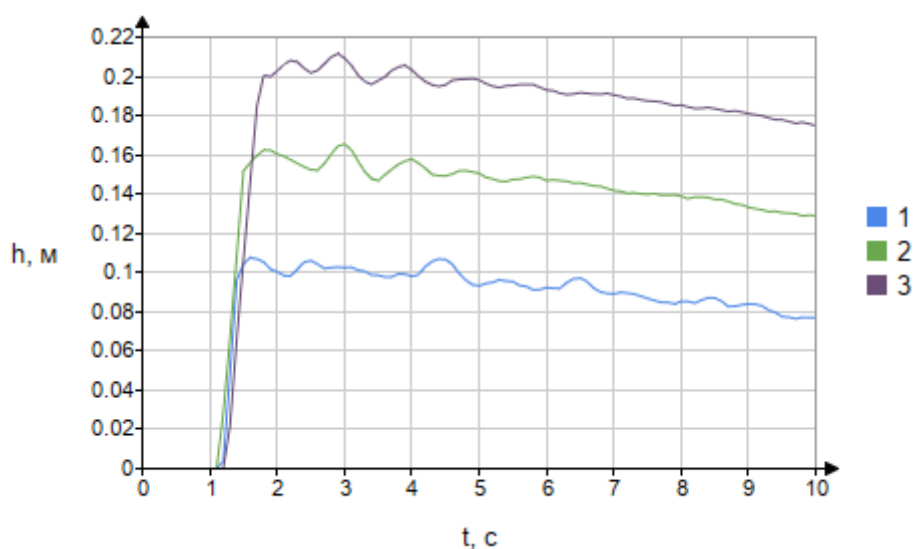


Рисунок 2 – Толщины стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
Source: compiled by the authors.

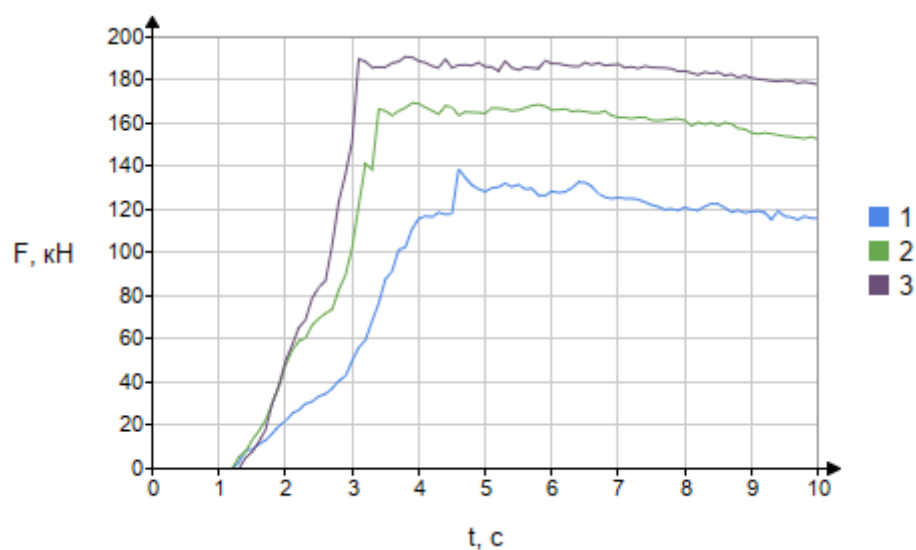


Рисунок 3 – Силы сопротивления передвижению при толщинах стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
 Источник: составлено авторами.

Figure 3. – Resistance forces to movement with chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
 Source: compiled by the authors.

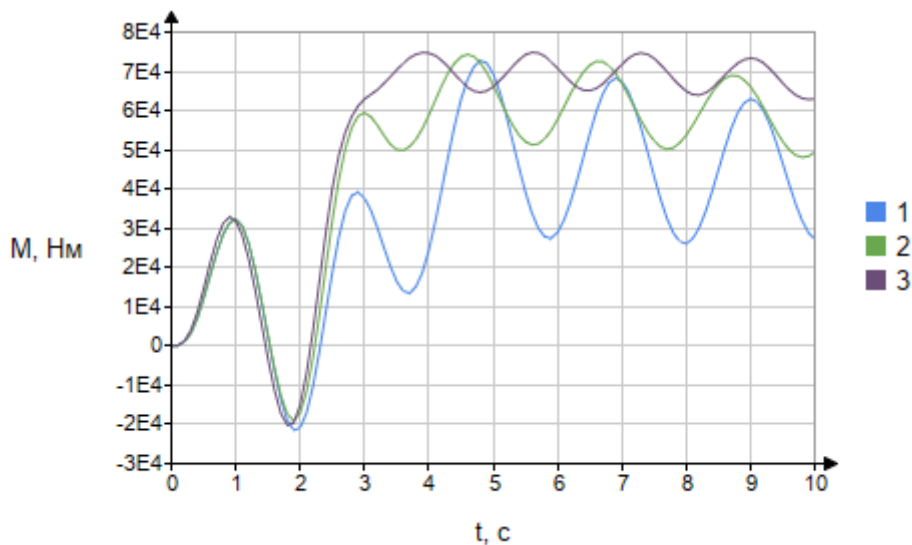


Рисунок 4 – Моменты на ведущих колесах при толщинах стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Torques on the driving wheels with chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
 Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Статистические параметры сил, действующих в процессе копания грунта
Источник: составлено авторами.

Table 2

Statistical parameters of the forces acting during the soil cutting and moving process
Source: compiled by the authors.

Наименование силового фактора	Эксперимент 1			Эксперимент 2			Эксперимент 3		
	t_{mo}	min	max	t_{mo}	min	max	t_{mo}	min	max
Силы сопротивления передвижению, кН	120	50	138	163	102	169	185	151	190
Момент на ведущих колесах, Нм	76452	33472	97218	59078	48093	74294	69032	76285	62852

Анализ рисунков показывает, что силы сопротивления передвижению находятся в функциональной зависимости от толщины стружки. В процессе копания силы сопротивления передвижению имеют колебания, обусловленные колебаниями сил сопротивления копанию и особенностями процесса копания. С набором призмы волочения силы сопротивления передвижению увеличиваются, что обусловлено ростом призмы волочения. Относительная составляющая от сил сопротивления резанию снижается, соответственно амплитуда сил сопротивления передвижению невысока. Изменения вращающего момента на ведущих колесах (см. рисунок 4) обусловлены не столько периодическим изменением сил сопротивления копанию, сколько силами инерции бульдозера и временем реакции двигателя на изменение текущего нагружения вследствие постоянно меняющихся сил сопротивления перемещению. Статистические параметры сил, возникающих в процессе копания грунта, представлены в таблице 2. Учитывая, что в период до 3 сек происходит набор призмы волочения, в выборку для анализа вошло время движения бульдозера с 3 до 10 сек.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изменении колебаний сил сопротивления передвижению отсутствует гармонический характер, а в изменении колебаний момента на ведущих колесах имеется явно выраженный гармонический характер. Независимо от толщины стружки период колебаний составляет примерно 2 сек. Таким образом, величины моментов на ведущих колесах определяются собственными колебаниями машины и зависят от её массово-геометрических характеристик. Часто при проведении прочностных расчетов используют статические величины сил

сопротивления передвижению и корректируют их с помощью коэффициентов динамичности. Для рассматриваемого случая коэффициенты динамичности изменяются от 1,15 при толщине стружки 100 мм до 1,03 при толщине стружки 150 и 200 мм.

Таким образом, коэффициенты динамичности не имеют постоянных значений, стремятся к максимальным значениям при небольших нагрузках и снижаются при увеличении нагрузок. Вследствие этого если для расчета конструкций принимать максимальные значения статических нагрузок, то коэффициенты динамичности можно принимать минимальными. В то же время при проведении прочностных расчетов, как правило, используются коэффициенты запаса, которые часто рекомендуется принимать равными 20% по отношению к статическим нагрузкам, и в этом случае от использования коэффициентов динамичности можно отказаться.

Результаты имитационных исследований показывают, что гусеничный движитель испытывает динамический режим нагружения в процессе выполнения бульдозером технологических операций. Использование математической и имитационных моделей процесса копания грунта бульдозером позволяет установить диапазон значений коэффициента динамичности. Полученные значения коэффициентов динамичности соответствуют установленным величинам, используемым в практике проектирования. Новыми результатами можно считать величины коэффициентов динамичности в различных режимах нагружения, а также снижение величин коэффициентов динамичности при увеличении нагрузок на рабочее оборудование бульдозера.

Полученные результаты позволяют предположить, что проведение прочностных расче-

тов при максимальных нагрузках на рабочее оборудование можно проводить, не учитывая коэффициенты динамичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы исследования позволяют получить значения моментов, возникающих на ведущих колесах бульдозера в процессе копания грунта при разных толщинах стружки. Динамическая, математическая и имитационные модели, разработанные на основе системного подхода, учитывающие параметры двигателя, трансмиссии, движителя, рабочего оборудования и внешней среды позволяют путем проведения имитационных экспериментов смоделировать движение бульдозера в режиме копания с различными толщинами стружки и определить нагруженность исследуемых механизмов и систем. Исследование характеристик моментов, возникающих на ведущих колесах гусеничных бульдозеров, позволило установить, что величины коэффициентов динамичности зависят от уровня нагрузок на ведущих колесах. При максимальных нагрузках значения коэффициентов динамичности снижаются по сравнению со средними нагрузками и составляют не более 3% при максимальных нагрузках и до 20% при средних нагрузках.

Таким образом, при проведении прочностных расчетов ведущих колес и валов трансмиссии, когда используются максимальные нагружающие усилия и моменты при работе бульдозера, значения коэффициентов динамичности можно принимать минимальными или не учитывать. Необходимо отметить, что данные выводы нельзя распространять на все системы и механизмы бульдозера. Для определения коэффициентов динамичности, действующих в других механизмах и системах, необходимо проведение дополнительных исследований, позволяющих учитывать их влияние на основе системного подхода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тараторкин А.И., Абдулов С.В., Держанский В.Б., Волков А.А., Сарач Е.Б., Комиссаров А.И. Расчетно-экспериментальное исследование динамики обвода гусеничного движителя транспортной машины высокой проходимости // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2024. № 4 (69). С. 50–60.
2. Strutynskiy S. Mathematical modelling of a specialized vehicle caterpillar mover dynamic processes under condition of the distributing the parameters of the caterpillar // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 4.3. Pp. 40–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19549>
3. Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Абдулов С.В., Волков А.А., Тараторкин А.И. Динамика процессов взаимодействия элементов гусеничного движителя при наезде первого опорного катка на неровность // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2023. Т. 23, № 3. С. 27–38.
4. Поддубный В.И., Трехтлер А., Варкентин А., Хенке К. Механико-математическая модель гусеничного движителя с треугольным обводом для решения задач вертикальной динамики гусеничной машины // *Вестник машиностроения*. 2020. № 12. С. 26–29.
5. Гудков В.В., Сокол П.А., Могутнов Р.В., Колтаков А.А. Анализ динамики движения гусеничных машин // В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж, 2021. С. 322–327.
6. Лесковец И.В., Леоненко О.В., Бужинский А.Д. Влияние параметров гусеничного обвода на давление опорных траков на грунт // В сборнике: *Интерстроймех-2014. Материалы Международной научно-технической конференции*. 2014. С. 45–48.
7. Балакин П.Д., Кузнецов Э.А., Скрипниченко Д.А., Рахимжанов Н.Е. Математическое моделирование динамики движения многоцелевых гусеничных машин // *Омский научный вестник*. 2012. № 3 (113). С. 40–44.
8. Алябьев В.А., Бердов Е.И. Особенности взаимодействия гусеничного движителя с деформируемой опорной поверхностью при неравномерном движении машины // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2021. Т. 21, № 4. С. 49–60.
9. L. Zhou, J. Gao, C. Hu, Q. Li. Numerical simulation and testing verification of the interaction between track and sandy ground based on discrete element method // *Journal of Terramechanics*. 2021. Vol. 95: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.03.002>
10. Recuero A., Morales R., Nieto R., Aceituno J. F. Multi-body dynamics modelling and simulation of the ride behaviour of a tracked vehicle. *International Journal of Vehicle Design*, 2017. 73(4), 288–311.
11. Mohamed A. M., Wang D., Li D. Tracked Vehicle Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation Nonlinear Finite Elements. *Machines*, 2021. 9(5): 91.
12. Lee J.-H., Yoo J.-H., Han C.-S. Dynamic Loads and Fatigue Analysis of a Tracked Vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 2002. 3(2), 47–53.
13. Lee S. H., Yoo J. H., Han C. S. Dynamic Simulation of a Tracked Vehicle using RecurDyn. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2005. 22(11), 136–143.
14. Tao J., Deng Z., Cao X., Hu G., Wang, P. Modeling and dynamic characteristics of tracked vehicle equipped with symmetrical suspensions based on multi-body dynamics and discrete element coupling method. *Applied Sciences*, 2024. 14(22), 10045. <https://doi.org/10.3390/app142210045>

15. Stankovic M.R., Madonski R., Manojlovic S.M. Systematic design of adrc-based unmanned tracked vehicle trajectory tracking with fpga-in-the-loop validation // *Military Technical Courier*. 2024. T. 72. № 4. С. 1700–1725.

16. Swadi M. A. K., Al-Gailani A. M. S. A Review on Modeling and Simulation of Tracked Vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 870(1), 012115.

17. Лесковец И.В., Леоненко О.В., Бужинский А.Д. Нагруженность траков в гусеничном обводе // *Механизация строительства*. 2015. № 10 (856). С. 32–35.

18. Li J., Wang H., Chen Z. Comparative study of mathematical models in vehicle dynamics with applications to tracked vehicles // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 45678–45690.

REFERENCES

1. Taratorkin A.I., Abdulov S.V., Derzhanskii V.B., Volkov A.A., Sarach E.B., Komissarov A.I. Computational and experimental study of the dynamics of the bypass of a tracked propulsion system of a high-terrain transport vehicle // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2024; № 4 (69): 50–60. (In Russ.)

2. Strutynskiy S. Mathematical modelling of a specialized vehicle caterpillar mover dynamic processes under condition of the distributing the parameters of the caterpillar // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; Vol. 7, no. 4.3: 40–46. (In Russ.) <https://doi.org/https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19549>

3. Taratorkin I.A., Derzhanskii V.B., Abdulov S.V., Volkov A.A., Taratorkin A.I. Dynamics of the processes of interaction of the elements of the tracked propulsion system when the first support roller hits an unevenness // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2023; T. 23. № 3: 27–38. (In Russ.)

4. Poddubnyi V.I., Trekhtler A., Varkentin A., Khenke K. A Mechanical and mathematical model of a tracked propulsion system with a triangular outline for solving problems of vertical dynamics of a tracked vehicle // *Vestnik mashinostroeniya*. 2020; № 12.: 26–29. (In Russ.)

5. Gudkov V.V., Sokol P.A., Mogutnov R.V., Koltakov A.A. Analysis of the dynamics of tracked vehicles // *V sbornike: Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremenom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Voronezh*, 2021; С. 322–327. (In Russ.)

6. Leskovets I.V., Leonenko O.V., Buzhinskii A.D. The influence of the caterpillar track parameters on the pressure of the support tracks on the ground // *V sbornike: Interstroimekh* 2014. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2014; С. 45–48. (In Russ.)

7. Balakin P.D., Kuznetsov E.A., Skripnichenko D.A., Rakhimzhanov N.E. Mathematical modeling of motion dynamics of multi-purpose tracked vehicles

// *Omskii nauchnyi vestnik*. 2012; № 3 (113): 40–44. (In Russ.)

8. Alyab'ev V.A., Berdov E.I. Features of the interaction of the crawler with the deformable bearing surface during uneven movement of the machine // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2021; T. 21. № 4: 49–60. (In Russ.)

9. L. Zhou J. Gao C. Hu Q.Li. Numerical simulation and testing verification of the interaction between track and sandy ground based on discrete element method // *Journal of Terramechanics*. 2021; Vol. 95: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.tterra.2021.03.002>

10. Recuero A., Morales R., Nieto R., Aceituno, J.F. Multi-body dynamics modelling and simulation of the ride behaviour of a tracked vehicle. *International Journal of Vehicle Design*, 2017. 73(4): 288–311.

11. Mohamed A. M., Wang D., Li, D. Tracked Vehicle Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation Nonlinear Finite Elements. *Machines*, 2021; 9(5), 91.

12. Lee J.-H., Yoo J.-H., Han C.-S. Dynamic Loads and Fatigue Analysis of a Tracked Vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 2002; 3(2): 47–53.

13. Lee S.H., Yoo J. H., Han C. S. Dynamic Simulation of a Tracked Vehicle using RecurDyn. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2005; 22(11): 136–143.

14. Tao J., Deng, Z., Cao, X., Hu, G., Wang, P. Modeling and dynamic characteristics of tracked vehicle equipped with symmetrical suspensions based on multi-body dynamics and discrete element coupling method. *Applied Sciences*, 2024; 14(22), 10045. <https://doi.org/10.3390/app142210045>

15. Stankovic M.R., Madonski R., Manojlovic S.M. Systematic design of adrc-based unmanned tracked vehicle trajectory tracking with fpga-in-the-loop validation // *Military Technical Courier*. 2024; T. 72. № 4: 1700–1725.

16. Swadi M. A. K., Al-Gailani, A. M. S. A Review on Modeling and Simulation of Tracked Vehicles. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 2020; 870(1), 012115.

17. Leskovets I.V., Leonenko O.V., Buzhinskii A.D. Loading of tracks in a tracked track // *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2015; № 10 (856): 32–35. (In Russ.)

18. Li J., Wang H., Chen Z. Comparative study of mathematical models in vehicle dynamics with applications to tracked vehicles // *IEEE Access*. 2024; Vol. 12: 45678–45690.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесковец И.В. Математический расчет, оформление графической и табличной информации, написание и оформление статьи.

Грачев А.А. Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по методикам, определения динамических характеристик гусеничных бульдозеров.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Leskovets I.V. Mathematical calculation, graphic and tabular design, writing and editing the article.

Grachev A.A. Analysis of domestic and foreign research works on methods for determining the dynamic characteristics of tracked bulldozers.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесковец Игорь Вадимович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Белорусско-Российского университета (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author ID: 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-код: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Грачев Алексей Андреевич – канд. техн. наук, доц., директор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29б).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4550-7636>,

Scopus Author: 57203459807,

Researcher ID: AAN-1868-2021,

SPIN-код: 9015-8535,

e-mail: grachev_aa@spbstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leskovets Igor' V. – Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, "Transport and Technological Machines", Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author ID: 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-code: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Grachev Aleksey A. – Candidate of Technical Sciences (Engineering), Director, Higher Transport School, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 B, Politekhnicheskaya Street, Akademicheskoe, Municipal District, St. Petersburg, 195251).

Scopus Author ID: 57203459807,

Researcher ID: AAN-1868-2021,

SPIN-code: 9015-8535,

e-mail: grachev_aa@spbstu.ru

Научная статья
УДК 624.138.22: 51-7
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>
EDN: HEWKSB



ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРУНТА

И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
tyuremnovis@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве широкое применение получили вибрационные катки. В связи с высокими значениями вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем, вибрационный валец катка совершает колебания с периодическим отрывом от грунта. Исследование особенностей данных режимов колебаний имеет большое значение при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков при проектировании.

Материалы и методы. В работе представлена трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом. Масса грунта равнялась 20% массы вальца. Свойства грунта моделировалась схемой Фойгта. Реологическая модель позволяет воспроизводить различные режимы взаимодействия вальца с грунтом: без отрыва и с различными видами отрыва от грунта.

Результаты. На основании результатов вычислительного эксперимента с тестовыми вибрационными катками установлены характерные особенности колебаний вальца и рамы катка, а также изменения контактной силы и продолжительности нагружения и разгрузки грунта при реализации режимов колебаний «постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» и колебаний кратности 2. Обоснована целесообразность разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний при сравнительной высокой продолжительности действия контактной силы, что обеспечивает повышение глубины распространения напряжений и, соответственно, толщины уплотняемого слоя грунта.

Обсуждение и заключение. В работе уточнены критерии отнесения реализуемых режимов колебаний к режимам «постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» и колебаний кратности 2. Также представлены новые данные по значениям продолжительности нагружения и разгрузки грунта при реализации различных режимов колебаний вальца вибрационного катка, что имеет большое значение при определении глубины распространения напряжений и уплотнения грунта на глубине.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, динамическое уплотнение, каток вибрационный, моделирование реологическое, моделирование динамическое, режим работы, вынуждающая сила, контактная сила, амплитуда колебаний, время нагружения, время разгрузки, жесткость грунта

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору ЯГТУ Евгению Фёдоровичу Скурыгину за консультации при разработке реологической модели. Также автор благодарит редакторов и рецензентов данной работы.

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Тюремнов И.С. Особенности режимов взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью грунта // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 40-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>

© Тюремнов И.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>
EDN: HEWKSB

FEATURES OF INTERACTION MODES OF VIBRATORY ROLLER DRUM AND SOIL SURFACE

Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Vibratory rollers are widely used for soil compaction mechanization in road construction. Due to high values of the driving force generated by the vibration exciter, there is periodic separation of the vibratory roller drum from the ground during oscillations. The study into the features of these oscillation modes is of great importance in determining technical characteristics of vibratory rollers during design.

Materials and methods. The paper presents a three-mass rheological model of the Frame-Drum-Soil system with a deformable drum, the soil mass being equal to 20% of the drum mass. Voigt model was used to model the soil properties. The rheological model allows reproducing different modes of drum and soil interaction: those without and with various types of separation from the soil.

Results. Based on the results of computational experiment with a test vibratory roller, the characteristic features of the drum and the roller frame vibrations, as well as changes in the contact force and soil loading and unloading time for “continuous contact”, “partial uplift”, “double jump” oscillation modes and two-fold oscillations have been established. The expediency of developing promising soil compacting machines operating in two-fold oscillations mode and having an increased compaction performance due to the significantly greater contact force compared to the driving force of the installed vibration exciter and a comparatively long time for the contact force, which provides an increase in the depth of stress propagation and, accordingly, the thickness of the compacted soil layer.

Discussion and conclusion. The paper specifies the criteria for determining the oscillation modes implemented as the “constant contact”, “partial separation”, “double jump” modes or two-fold oscillations. New data are also presented on the values of soil loading and unloading time for various modes of drum vibration, which is important for determining the depth of stress propagation and deep soil compaction.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, dynamic compaction, vibratory roller, mathematical modeling, rheological modeling, numerical modeling, operational modes, driving force, contact force, the amplitude of the oscillations, soil loading time, soil unloading time, soil stiffness

ACKNOWLEDGEMENT: the author would like to recognize the efforts made by prof. Evgenij Skurygin who provided invaluable expert advice during rheological model development. The author would also like to thank the editors and the reviewers of his manuscript.

The article was submitted: September 16, 2025; approved after reviewing: December 12, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Tyuremnov I.S. Features of interaction modes of vibratory roller drum and soil surface. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 40-60. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-40-60>

© Tyuremnov Ivan S., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов является неотъемлемой частью технологического процесса строительства автомобильных дорог в промышленном, гражданском, мелиоративном и других видах строительства. Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве наиболее широко применение получили вибрационные катки.

Однако, несмотря на многолетний опыт проектирования и применения вибрационных катков, продолжаются дискуссии относительно обоснования технических характеристик катков при проектировании. Связано это со сложной динамикой взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой машины и с уплотняемым грунтом, высокими значениями вынуждающей силы вибровозбудителя (до 5 и более раз превышающей вес вибровальцового модуля [1] и приводящей к возникновению периодического отрыва вальца от грунта), сложностью процессов изменения напряженно-деформированного состояния уплотняемого грунта при динамических нагрузках и другими факторами.

Для исследования особенностей взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью уплотняемого грунта широко применяется реологическое моделирование. Исследователями предлагались различные реологические модели: одномассные (учитывающие только массу вальца [2, 3]; двухмассные, учитывающие массы вальца и грунта или вальца и рамы¹ [4, 5] трёхмассные, учитывающие массы вальца, рамы и грунта [6, 7, 8], а также многомассные [9]. Свойства грунта в реологических моделях учитываются идеализированными элементами упругого, вязкого и пластического сопротивления деформированию, установленных параллельно или последовательно в различных комбинациях. Хорошее сочетание сравнительной простоты и отображения существенных свойств грунта даёт моделирование грунта параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) [7, 10, 11].

При моделировании взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом важное значение имеет учет возможности

реализации не только безотрывного режима колебаний вальца на грунте (режим «постоянный контакт»), но и различных режимов с периодическим отрывом вальца от грунта, таких как «частичный отрыв», «двойной прыжок» и др. [6, 7, 12, 13, 14], представляющие наибольшую сложность, но при этом и наибольший практический интерес, поскольку наиболее эффективным режимом работы вибрационного катка является режим «частичный отрыв» [15]. Однако в работах отечественных исследователей вопросам анализа отрывных режимов взаимодействия вибрационного катка с грунтом уделяется недостаточно внимания. В работах зарубежных авторов встречаются различные трактовки отнесения колебаний к некоторым режимам. Также в известных работах практически не исследованы вопросы влияния реализуемых режимов колебаний на значения продолжительности нагружения и разгрузки грунта, оказывающие существенное влияние на глубину распространения напряжений в грунте и достигаемую плотность грунта на глубине.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования взаимодействия вальца вибрационного катка с поверхностью грунта была использована трёхмассная реологическая модель (рисунок 1), содержащая вибрационный валец массой m_d , раму массой m_r и грунт массой m_s . Валец связан с рамой через виброизоляторы, свойства которых моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) с коэффициентами k_f и b_f , соответственно. Упругие и вязкие деформации грунта также моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, k_s и b_s . Значение присоединенной массы грунта, на основании исследований [6, 16], рассчитывалось как $m_s = 0,2 \cdot m_d$. Деформируемость вальца катка моделировалась элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, k_d и b_d (см. рисунок 1). Более подробное описание реологической модели и сделанных допущений приведено в [17].

¹ Kaufmann K., Anderegg R. 3D-construction applications III: GPS-based compaction technology // Proc., 1st Int. Conf. Mach. Control Guid. 2008. P. 1–10.

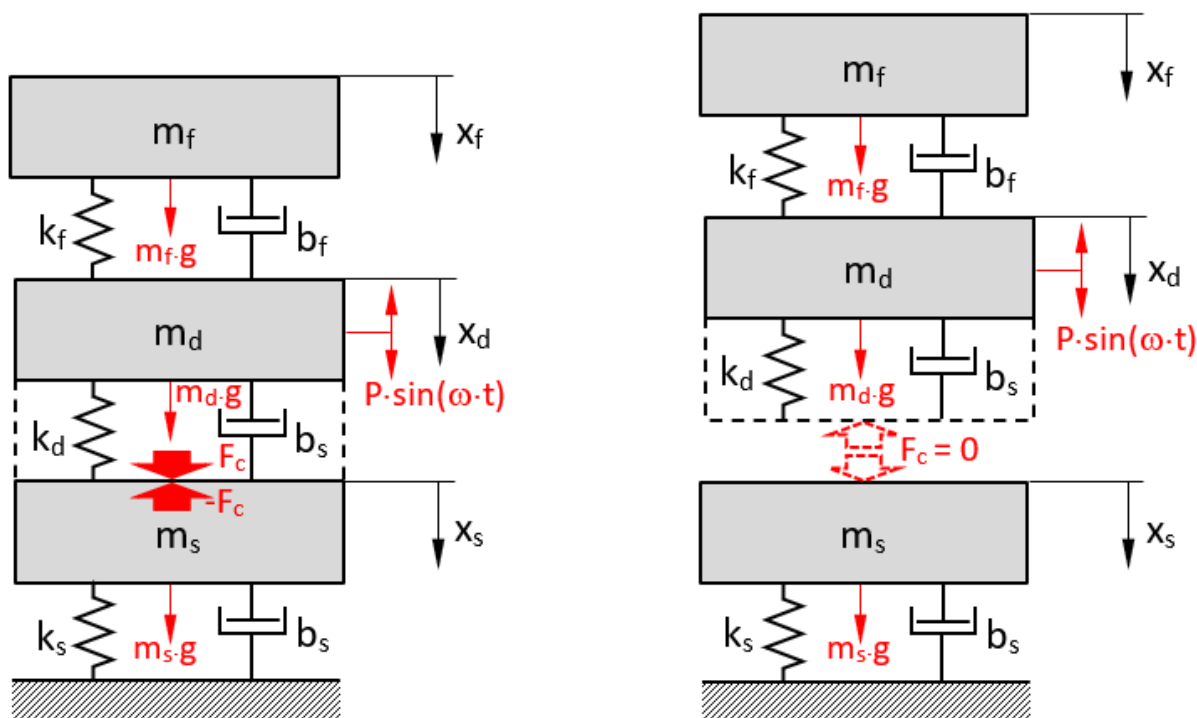


Рисунок 1 – Трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом (слева – в контакте с грунтом; справа – в отрыве от грунта) [17].

Figure 1 – Three-mass rheological model of Frame-Drum–Soil system with a deformable drum (on the left – in contact with the soil; on the right – in separation from the soil) [17].

Дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» в контакте с грунтом [17]:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) - k_f \cdot (x_f - x_d) + b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + \\ + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) - k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot g \end{cases}, \quad (1)$$

где $\ddot{x}_f, \ddot{x}_d, \ddot{x}_s$ – ускорение, соответственно, рамы, вальца и грунта, м/с²; b_f, b_d, b_s – коэффициенты вязкого сопротивления деформированию, соответственно, виброизоляторов, вальца и грунта, Н·с/м; $\dot{x}_f, \dot{x}_d, \dot{x}_s$ – вертикальная скорость перемещения, соответственно, рамы, вальца и грунта, м/с; k_f, k_d, k_s – коэффициенты упругого сопротивления деформированию, соответственно, виброизоляторов, вальца и грунта, Н/м; x_f, x_d, x_s – вертикальная координата, соответственно, рамы, вальца и грунта, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – вынуждающая сила, Н; ω – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

Дифференциальные уравнения движения масс в режиме отрыва от грунта [17]:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) - k_f \cdot (x_f - x_d) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s = m_s \cdot g. \end{cases} \quad (2)$$

Контактная сила (сила реакции грунта на валец):

$$F_c = b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g. \quad (3)$$

Условие неприлипания грунта к вальцу:

$$F_s > 0. \quad (4)$$

В режиме контакта с грунтом $F_c \leq 0$. В режиме отрыва от грунта $F_c = 0$.

Переход от режима отрыва от грунта (системе уравнений (2)) к режиму контакта с грунтом (системе уравнений (1)) осуществляется по условию

$$x_d \leq x_s. \quad (5)$$

Для численного решения систем уравнений (1)–(2) с учетом смены режимов контакта и отрыва от грунта была разработана расчетная схема в среде MATLAB Simulink.

Верификация реологической модели осуществлялась путем сравнения результатов расчета ускорений и перемещений вальца и рамы вибрационных катков DM-614, DM-617 и с результатами экспериментальных исследований, показавших в целом хорошее соответствие расчетных значений с экспериментальными данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После верификации по разработанной реологической модели было проведено исследование режимов колебаний, реализуемых вибрационным катком. Реализуемый режим колебаний оказывает большое влияние на эффективность функционирования грунтовых вибрационных катков. Однако данный вопрос практически не освещён в работах отечественных исследователей, поскольку в большинстве работ рассматриваются безотрывные режимы взаимодействия вальца вибрационного катка с уплотняемым грунтом [18, 19, 20]. В то время как за рубежом вопросами изучения отрывных режимов колебаний вибрационных катков стали активно заниматься после основополагающих работ D. Adam [13], R. Anderegg [15] и других авторов.

В зависимости от сочетания характеристик грунта, массы уплотняющего модуля вибрационного катка, вынуждающей силы, частоты колебаний, скорости движения катка и свойств уплотняемого грунта, колебания вальца могут осуществляться в режимах «постоянный контакт» (continuous contact), «частичный отрыв» (partial uplift), «двойной прыжок» (double jump),

«раскачивание» (rocking motion) и хаотических колебаний (chaotic motion) [13, 14, 15, 21] (рисунок 2). Смена режимов колебаний осуществляется в процессе уплотнения при изменении характеристик грунта (по мере его уплотнения) и режимов работы катка (характеризующихся сочетанием вынуждающей силы, частоты колебаний и скорости движения). Исследование разработанной трёхмассной реологической модели взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом показало возможность её использования для анализа характерных особенностей, присутствующих различным режимам колебаний.

На рисунках 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 представлены некоторые осциллограммы (полученные в MATLAB Simulink) изменения во времени различных параметров системы «рама-валец-грунт» при исследовании влияния свойств грунта на характеристики колебаний элементов тестового вибрационного катка с характеристиками: масса вальца $m_d = 4000$ кг; масса рамы вальца $m_f = 4000$ кг; масса присоединенного грунта $m_g = 800$ кг; частота колебаний $f = 30$ Гц; вынуждающая сила $P = 270$ кН; коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов рамы $k_f = 9,74$ МН/м; коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов рамы $b_f = 26$ кН·с/м [17]. Значение коэффициента упругого сопротивления деформированию вальца k_d определялось на основании анализа деформаций по трехмерной модели вальца катка DM-617 (предоставленной производителем ООО «Завод «Дорожных машин»», г. Рыбинск, Ярославская обл.) при нагружении погруженной части вальца распределенной нагрузкой от грунта и составило $k_d = 5000$ МН/м. Значение коэффициента вязкого сопротивления деформированию вальца b_d рассчитывалось с учетом рекомендаций разработчика программы «Универсальный механизм» и составило $b_d = 2000$ кН·с/м.

В процессе вычислительного эксперимента исследовалось влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s (в диапазоне $k_s = 20 \dots 200$ МН/м, соответствующему диапазону изменения коэффициента уплотнения песчаных грунтов $K_y = 0,892 \dots 1,088$) при постоянном значении коэффициента вязкого сопротивления грунта $b_s = 200$ кН·с/м.

drum motion	interaction drum-soil	mode of operation	soil contact force	application of CCC	soil stiffness	roller speed	excitation amplitude
periodic	continuous contact	Continuous Contact		yes	low ↓ high	fast ↓ slow	small ↓ large
	periodic loss of contact	Partial Uplift		yes			
		Double Jump		yes			
		Rocking Motion		no			
chaotic	non-period. loss of contact	Chaotic Motion		no	high	slow	large

Рисунок 2 – Основные режимы колебаний вальца вибрационного катка по D. Adam [14]

Figure 2 – The main modes of vibratory roller oscillations, according to D. Adam [14]

На рисунках 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 осциллограмма «X_d, X_s» отображает изменение во времени вертикальных координат вальца x_d (в метрах, чёрная линия) и грунта x_s (в метрах, розовая линия); осциллограмма « $F_c < 0$ » отображает изменение контактной силы (силы реакции грунта) F_c (в ньютонах); осциллограммы «X''f» и «Xf», соответственно, вертикальных ускорений рамы (м/с²) и вертикальных перемещений x_f рамы вибрационного катка (в метрах). Осциллограмма «U2» (см. рисунки 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) отображает значение условия U2, характеризующего наличие контакта между вальцом вибрационного катка и грунтом (при контакте U2 = 1, при отрыве U2 = 0). На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах).

В начальной стадии уплотнения грунта валец катка реализует режим колебаний «постоянный контакт» (см. рисунок 3). Для данного режима характерно совместное движение вальца и грунта на протяжении всего цикла каждого колебания. На протяжении всего времени в каждом цикле колебаний $(x_d - x_s) > 0$ (валец всегда контактирует с грунтом), т.е. значение условия U2 = 1. Значение контактной силы F_c на протяжении всего времени

каждого цикла колебания отрицательно (сила действует от грунта вверх на валец, ось координат направлена сверху вниз). Осциллограмма контактной силы имеет симметричный вид (продолжительность нагружения равна продолжительности разгрузки, т.е. $t_n = t_p$). Колебания рамы гармонические с постоянной частотой и амплитудой (см. рисунок 3). Таким образом, критериями реализации режима «постоянный контакт» являются:

- одновременное выполнение двух условий: U2 = 1 и $F_c < 0$ в течение всего времени внутри каждого цикла колебаний;
- равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд (и размахов) колебаний вальца x_d , рамы x_p , а также максимального значения контактной силы F_c^{max} ;
- осциллограмма контактной силы F_c имеет симметричный вид (продолжительность нагружения t_n равна продолжительности разгрузки t_p грунта, т.е. $t_n = t_p = 1/(2f)$ и являются максимальными для заданной частоты колебаний f);
- частота воздействий вальца на грунт и частота колебаний рамы равна частоте вынуждающей силы.

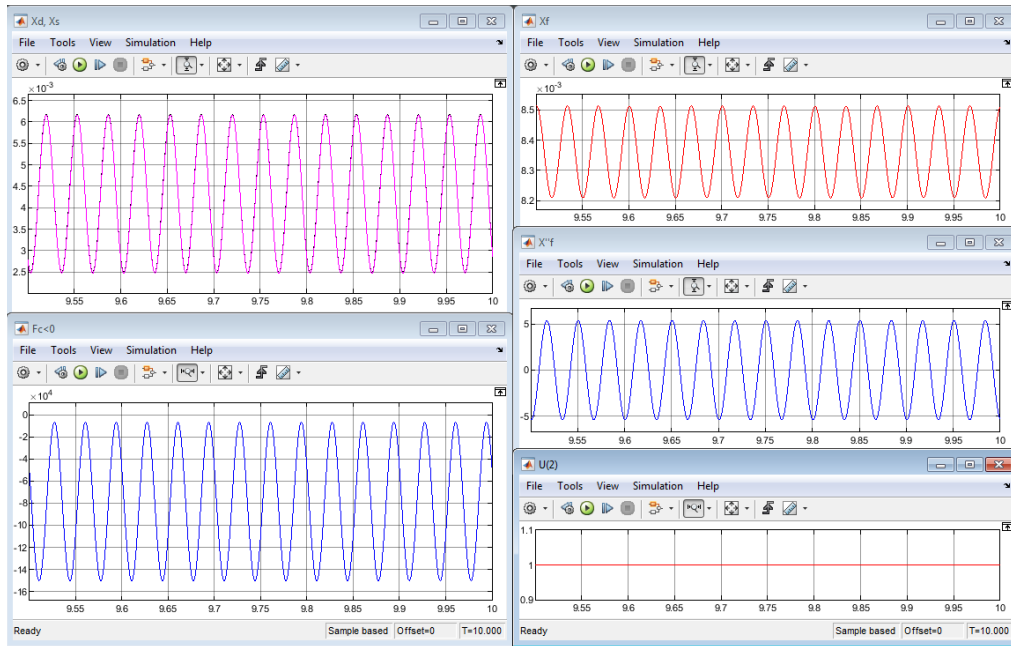


Рисунок 3 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 20$ МН/м (режим «постоянный контакт») Источник: составлено автором.

Figure 3 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 20$ MN/m ("continuous contact" mode) Source: compiled by the author.

В режиме «частичный отрыв» (см. рисунок 4) валец катка в каждом цикле колебаний отрывается от грунта (в пределах каждого цикла колебаний на некоторое время нарушается условие $(x_d - x_s) > 0$). Т.е. в пределах каждого цикла колебаний на некоторое время условие U_2 принимает значение $U_2 = 0$. При этом амплитуда смежных отскоков вальца одинакова. Размах колебаний рамы в смежных циклах колебаний также одинаков. Контактная сила F_c на фазе отрыва вальца от грунта (потери контакта вальца с грунтом) принимает нулевое значение, т.е. $F_c = 0$. Значения максимальной контактной силы F_c^{\max} в смежных циклах колебаний одинаковы. Осциллограмма изменения контактной силы F_c в каждом цикле колебаний становится асимметричной (продолжительность разгрузки грунта t_p превышает продолжительность нагружения t_H , т.е. $t_p > t_H$). Это соответствует наблюдаемой в эксперимен-

тальных исследованиях характерной особенности изменения контактных напряжений [22] в режиме «частичный отрыв». Сохраняется гармонический характер колебаний рамы с постоянной частотой и амплитудой.

Таким образом, критериями реализации режима «частичный отрыв» являются:

- выполнение на некоторое время в каждом цикле колебаний условий: $U_2 = 0$ и $F_c = 0$;
- равенство на смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца x_d , рамы x_p , а также максимального значения контактной силы F_c^{\max} ;
- асимметричный вид осциллограммы контактной силы F_c (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. $t_H < t_p$, $t_H < 1/(2f)$; $t_p < 1/(2f)$);
- частота воздействий вальца на грунт и частота колебаний рамы равна частоте вынуждающей силы.

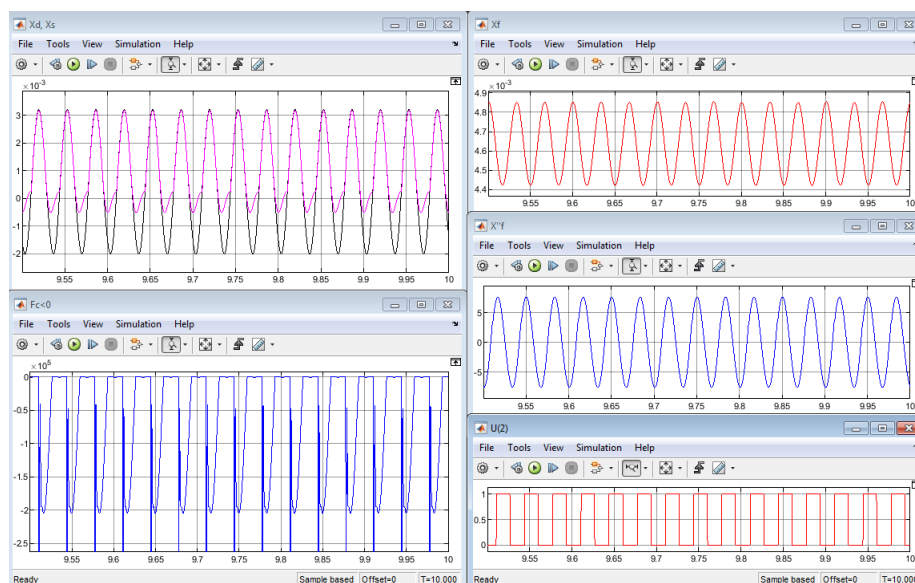


Рисунок 4 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 80$ МН/м (режим «частичный отрыв») Источник: составлено автором.

Figure 4 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 80$ MN/m ("partial uplift" mode) Source: compiled by the author.

По данным зарубежных исследователей, колебания в конце режима «частичный отрыв» являются наиболее эффективным режимом колебаний вальца вибрационного катка при уплотнении грунта [15].

В режиме «двойной прыжок» (см. рисунки 5, 6, 7,8) в смежных циклах колебаний максимальные и минимальные амплитудные значения вертикальных перемещений и вальца и рамы становятся различны. Причем по мере уплотнения грунта увеличивается разница в амплитудных значениях перемещений вальца и рамы с максимальными и минимальными амплитудами. Для перемещений рамы гармоника с минимальными амплитудами колеба-

ний быстро вырождается (см. осциллограмму «Xf» на рисунке 6) и частота колебаний рамы становится в 2 раза меньше частоты колебаний вальца (см. рисунок 7). При этом размах колебаний рамы возрастает. Для вертикальных колебаний вальца гармоника с малыми амплитудами сохраняется на протяжении всего режима «двойной прыжок».

Для осциллограммы изменения контактной силы F_c характерна асимметричность осциллограммы в каждом цикле колебаний как с большой, так и с малой амплитудами (во всех случаях продолжительность разгрузки грунта t_p превышает продолжительность нагружения t_n , т.е. $t_p > t_n$).

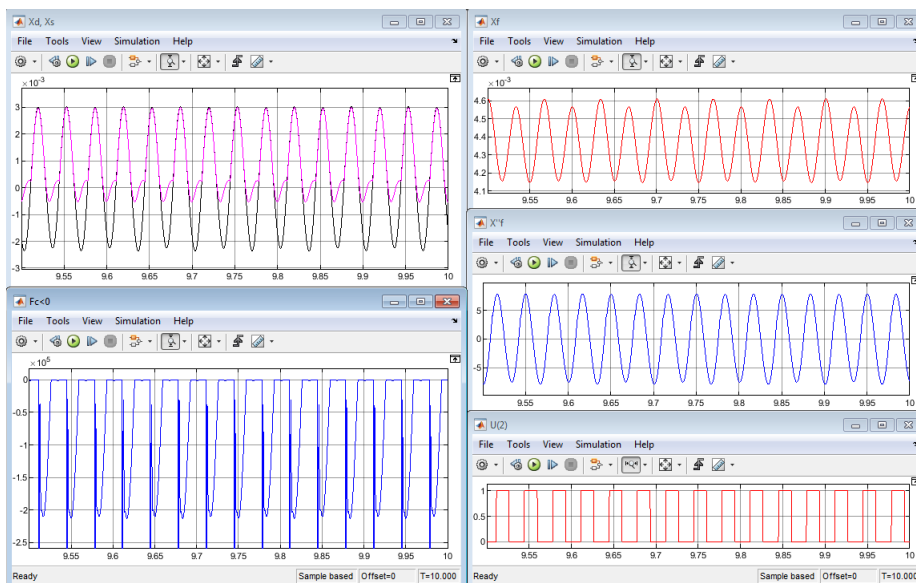


Рисунок 5 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 90$ МН/м (начало режима «двойной прыжок») Источник: составлено автором.

Figure 5 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 90$ MN/m (the beginning of the “double jump” mode) Source: compiled by the author.

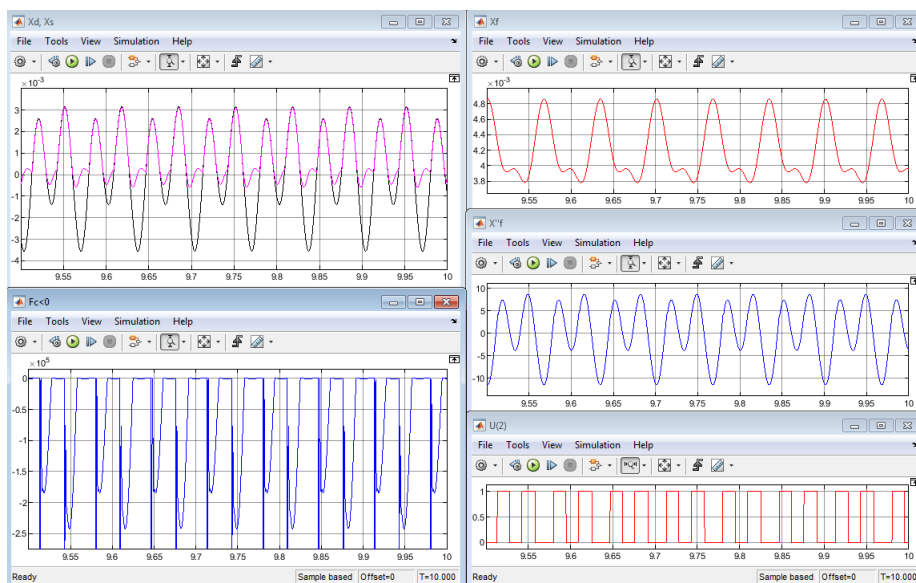


Рисунок 6 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 95$ МН/м (режим «двойной прыжок») Источник: составлено автором.

Figure 6 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 95$ MN/m (“double jump” mode) Source: compiled by the author.

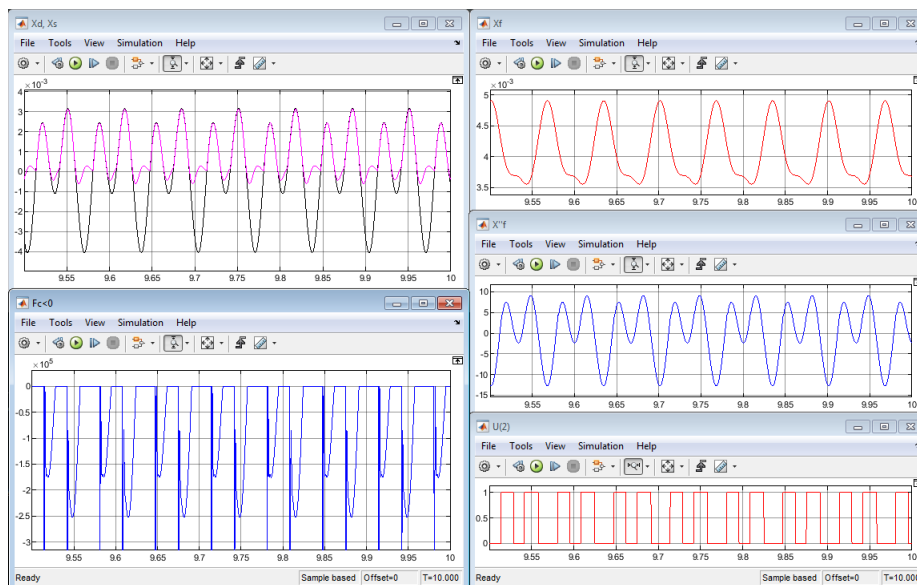


Рисунок 7 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 98$ МН/м (режим «двойной прыжок», изменение частоты колебаний рамы)
Источник: составлено автором.

Figure 7 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 98$ MN/m (“double jump” mode, changing the vibratory frequency of the frame)
Source: compiled by the author.

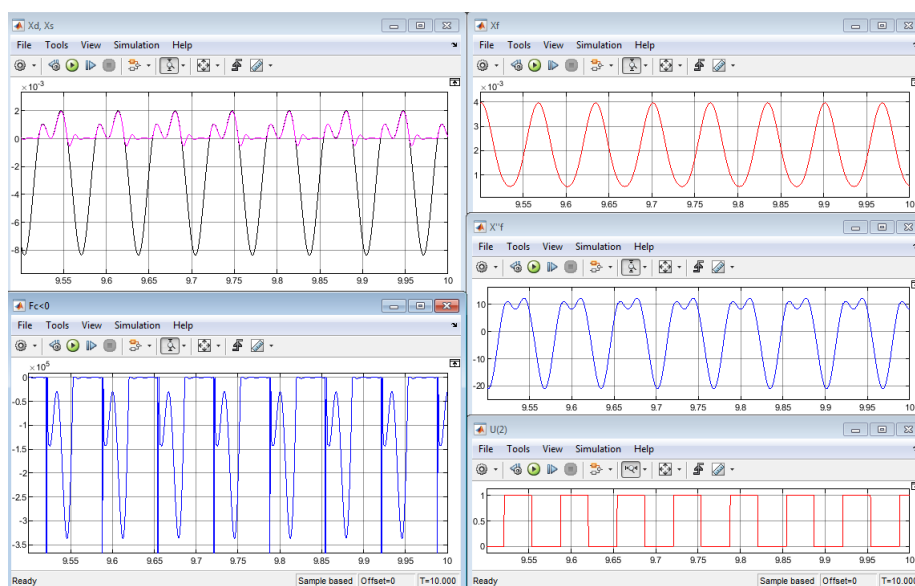


Рисунок 8 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 200$ МН/м (режим «двойной прыжок», исчезновение отрыва от грунта в воздействии с малой амплитудой)
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ kN at $k_s = 200$ MN/m (“double jump” mode, uplift disappearance, a low-amplitude impact)
Source: compiled by the author.

Однако на поздних стадиях режима «двойной прыжок» колебание вальца с малой амплитудой может осуществляться без отрыва от грунта (см. рисунок 8). При этом на осциллограмме контактной силы между воздействиями с минимальной и максимальной амплитудой значения F_c могут не достигать нуля. Осциллограммы F_c воздействий с минимальной и максимальной амплитудой асимметричны, но характер их различен. Осциллограмма F_c воздействия с малой амплитудой асимметрична со сдвигом влево (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. $t_h < t_p$), а осциллограмма F_c воздействия с большой амплитудой асимметрична со сдвигом вправо (продолжительность нагружения больше продолжительности разгрузки, т.е. $t_h > t_p$).

Таким образом, критериями реализации режима «двойной прыжок» являются:

- выполнение на некоторое время в каждом цикле колебаний условий: $U_2 = 0$ и $F_c = 0$;
- неравенство в смежных циклах соответствующих значений амплитуд колебаний вальца x_{gr} , рамы x_p , а также максимального значения контактной силы F_c^{max} (или реализация рамой колебаний с частотой в 2 раза меньшей частоты колебаний вальца);
- асимметричный вид осциллограмм

контактной силы F_c (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. $t_h < t_p$ или для поздних стадий режима «двойной прыжок», для воздействия с малой амплитудой $t_h < t_p$, а для воздействия с большой амплитудой $t_h > t_p$). Во всех случаях $t_h < 1/(2f)$; $t_p < 1/(2f)$;

– частота воздействий вальца на грунт равна частоте вынуждающей силы. Частота колебаний рамы становится в 2 раза меньше частоты вынуждающей силы.

При дальнейшем увеличении значения k_s колебания должны переходить в более сложные режимы («раскачивания», кратных колебаний и др). Однако при работе тестового катка с вынуждающей силой 270 кН не наблюдаются более сложные режимы колебаний, например, кратных колебаний, даже при $k_s = 200$ МН/м.

Для получения осциллограмм, характерных для более сложных режимов, например, режима кратных колебаний, было увеличено значение вынуждающей силы тестового вибрационного катка с 270 до 300 кН. При $k_s = 180$ МН/м для тестового катка с вынуждающей силой 300 кН гармоника колебаний вальца с малой амплитудой практически вырождается. При $k_s = 183$ МН/м колебания реализуются в режиме кратных колебаний с кратностью 2 (см. рисунок 9).

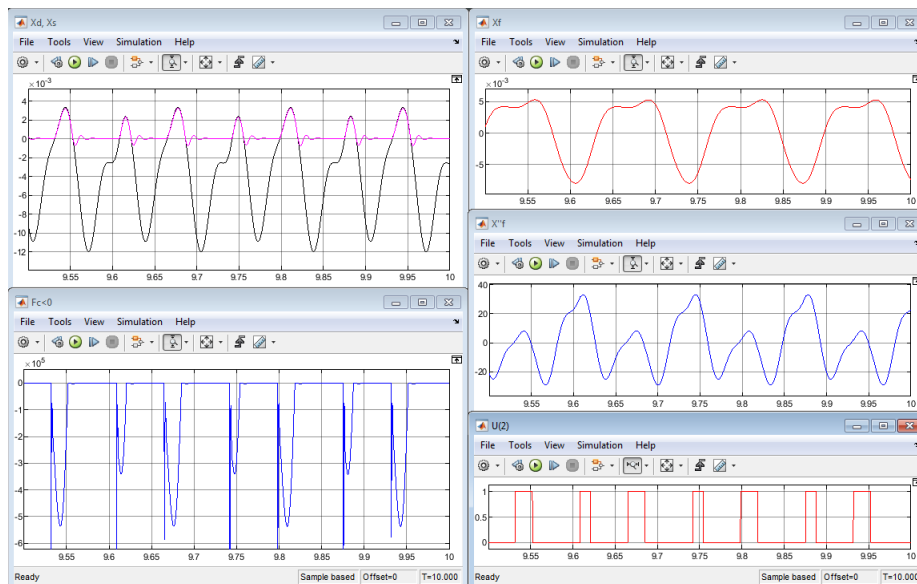


Рисунок 9 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 300$ кН при $k_s = 183$ МН/м (режим колебаний с кратностью 2)
Источник: составлено автором.

Figure 9 - Oscillations of various elements of the test vibratory roller with $P = 300$ kN at $k_s = 183$ MN/m (two-fold oscillations mode)
Source: compiled by the author.

Каждое воздействие на грунт валец наносит через 2 оборота вибровозбудителя, что соответствует удвоению периода или уменьшению в 2 раза частоты воздействий на грунт. Амплитуды колебаний вальца на смежных воздействиях снова начинают различаться. Также происходит очередное удвоение периода колебаний рамы при одновременном резком увеличении общего размаха её колебаний. Амплитудные значения максимальной контактной силы в смежных воздействиях снова начинают различаться при одновременном росте численных значений F_c^{\max} . Восстанавливается асимметрия осциллограммы F_c , при которой продолжительность нагружения t_n меньше продолжительности разгрузки t_p ($t_n < t_p$) в циклах и с максимальной, и с минимальной F_c^{\max} .

Таким образом, критериями отнесения колебаний к режиму колебаний кратности 2 являются:

- наличие периодического отрыва вальца от грунта ($U_2 = 0$ и $F_c = 0$) в течение более, чем 50% общего времени;
- удвоение периода времени между воздействиями вальца на грунт;
- второе удвоение периода колебаний рамы (основная частота колебаний рамы в 2 раза меньше частоты воздействий вальца на грунт);
- неравенство значений амплитуд колебаний вальца x_d , а также максимального значения контактной силы F_c^{\max} в смежных циклах воздействия на грунт;
- асимметричный вид осциллограммы контактной силы F_c (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. $t_n < t_p$) в каждом цикле воздействия на грунт.

В отечественной практике для описания работы вибрационного катка в режиме кратности колебаний 2 также применяется термин «козление»².

На рисунках 10, 11, 12, 13, 14 представлены некоторые результаты моделирования влияния изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на размах колебаний вальца x_d , рамы вальца x_f , а также максимальное значение контактной силы F_c^{\max} . Результаты получены для тестового вибрационного катка с характеристиками: масса вальца $m_d = 4000$ кг; масса рамы вальца $m_f = 4000$ кг;

масса присоединенного грунта $m_f = 800$ кг; частота колебаний $f = 30$ Гц; вынуждающая сила $P = 300$ кН; коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов рамы $k_f = 9,74$ МН/м; коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов рамы $b_f = 26$ кН·с/м. Коэффициент вязкого сопротивления грунта $b_s = 200$ кН·с/м.

Диапазон значений $k_s < 20$ МН/м является нехарактерным для работы вибрационных катков, поскольку соответствует малым значениям коэффициента уплотнения грунта ($K_y < 0,89$) (или значению динамического модуля деформации грунта $E_{vd} < 13$ МПа), т.е. состоянию грунта после отсыпки перед началом уплотнения. Поскольку для тестового катка с $P = 300$ кН относительная вынуждающая сила составляет $P/Q_b = 3,75$ (что существенно превышает критические значения, установленные Н.Я. Хархутой³), то даже при малых значениях k_s колебания реализуются не в режиме «постоянный контакт», а в режиме «частичный отрыв». Режим «частичный отрыв» наблюдается вплоть до $k_s \leq 80$ МН/м. В режиме «частичный отрыв», являющимся основным режимом работы вибрационных катков, в процессе уплотнения грунта (сопровождающегося увеличением значения k_s) с увеличением значений k_s размах колебаний вальца x_d и рамы x_f катка, а также максимальной контактной силы F_c^{\max} возрастает по почти линейному закону (см. рисунки 10, 11, 12). При этом следует отметить, что в режимах «постоянный контакт» и «частичный отрыв» контактная сила, передаваемая вальцом вибрационного катка в грунт в 1,5...2 раза меньше вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем вальца катка. В процессе уплотнения грунта, вследствие увеличения размаха x_d колебаний вальца вибрационного катка, увеличивается и время, в течение которого теряется контакт вальца с грунтом, что при постоянной частоте колебаний приводит к уменьшению продолжительности фазы контакта с грунтом, а следовательно, к уменьшению времени нагружения грунта t_n и времени его разгрузки t_p (см. рисунки 13, 14). При этом с увеличением k_s возрастает асимметричность осциллограммы изменения контактной силы F_c в каждом цикле колебаний (продолжительность разгрузки грунта t_p все больше превышает продолжительность нагружения t_n , т.е. увеличивается соотношение t_p/t_n).

² Уплотнение и укладка. Теория и практика. С-Пб.: Динапак СНГ, Рекламное агентство А.М.Г., 2008. 90 с.

³ Хархута Н.Я. Дорожные машины. Теория конструкция и расчет : учебник для вузов. 2-е изд.. Л: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. 472 с.

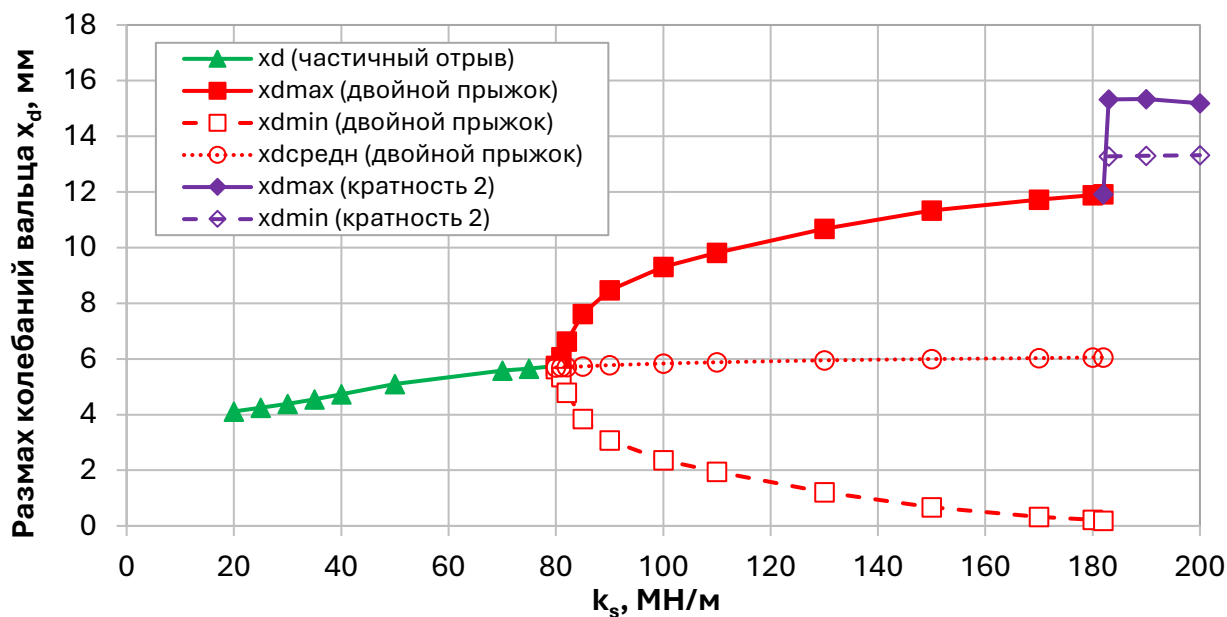


Рисунок 10 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на размах колебаний вальца x_d тестового вибрационного катка при $P = 300$ кН
 Источник: составлено автором.

Figure 10 – The effect of changes in soil elastic resistance coefficient k_s on the drum oscillations amplitude in the test vibratory roller at $P = 300$ kN
 Source: compiled by the author.

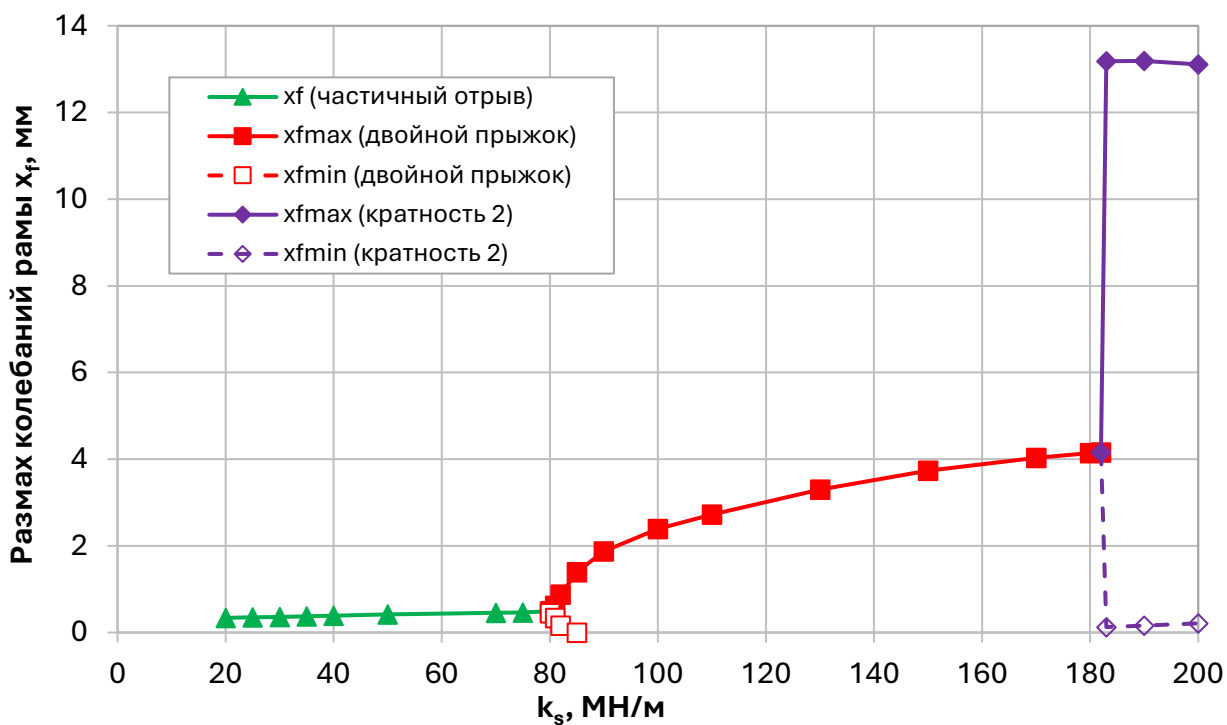


Рисунок 11 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на размах колебаний рамы x_f тестового вибрационного катка при $P = 300$ кН
 Источник: составлено автором.

Figure 11 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient k_s on the frame oscillations amplitude x_f in the test vibratory roller at $P = 300$ kN
 Source: compiled by the author.

При $k_s = 80$ МН/м у тестового вибрационного катка с $P = 300$ кН наблюдается смена режима колебаний «частичный отрыв» на «двойной прыжок». Это сопровождается качественными изменениями в характере колебаний и амплитудных значениях размаха колебаний вальца x_d , рамы x_f и контактной силы (силы реакции грунта) F_c^{\max} . Значению $k_s = 80$ МН/м соответствует точка бифуркации, после которой в колебаниях начинают присутствовать две гармоники – высокоамплитудная (соответственно, $x_{d\max}$, $x_{f\max}$ и F_{c1}^{\max}) и низкоамплитудная (соответственно, $x_{d\min}$, $x_{f\min}$ и F_{c2}^{\max}) (см. рисунки 10, 11, 12). Размах колебаний вальца и рамы катка на высокоамплитудной гармонике скачкообразно возрастает, что негативно влияет на управляемость катка, приводит к резкому увеличению динамических нагрузок на амортизаторы, подшипники, шарнир сочленения и другие узлы конструкции вибрационного катка, увеличению уровня вибрации во всех элементах конструкции, в т.ч. вибрации, передаваемой на оператора. Резкое увеличе-

ние контактной силы (силы реакции грунта) может приводить к избыточному воздействию и разрушению уплотняемого материала. В колебаниях рамы низкоамплитудная гармоника быстро вырождается, и колебания переходят в режим с частотой, меньшей в 2 раза (см. рисунки 6, 7, 8). В колебаниях вальца частота колебаний высокоамплитудной и низкоамплитудной гармоник совпадают. После возникновения режима «двойной прыжок», при дальнейшем увеличении значения k_s (в процессе уплотнения грунта) наблюдается одновременное увеличение размаха колебаний вальца на высокоамплитудной гармонике и уменьшение размаха колебаний на низкоамплитудной гармонике (см. рисунки 10, 12). При этом среднее значение размаха колебаний вальца x_{dcp} и контактной силы F_{csp} практически не изменяется. Только в режиме «двойной прыжок» значение максимальной контактной силы F_c^{\max} достигает значения вынуждающей силы P , а затем и превышает значение P (см. рисунок 12).

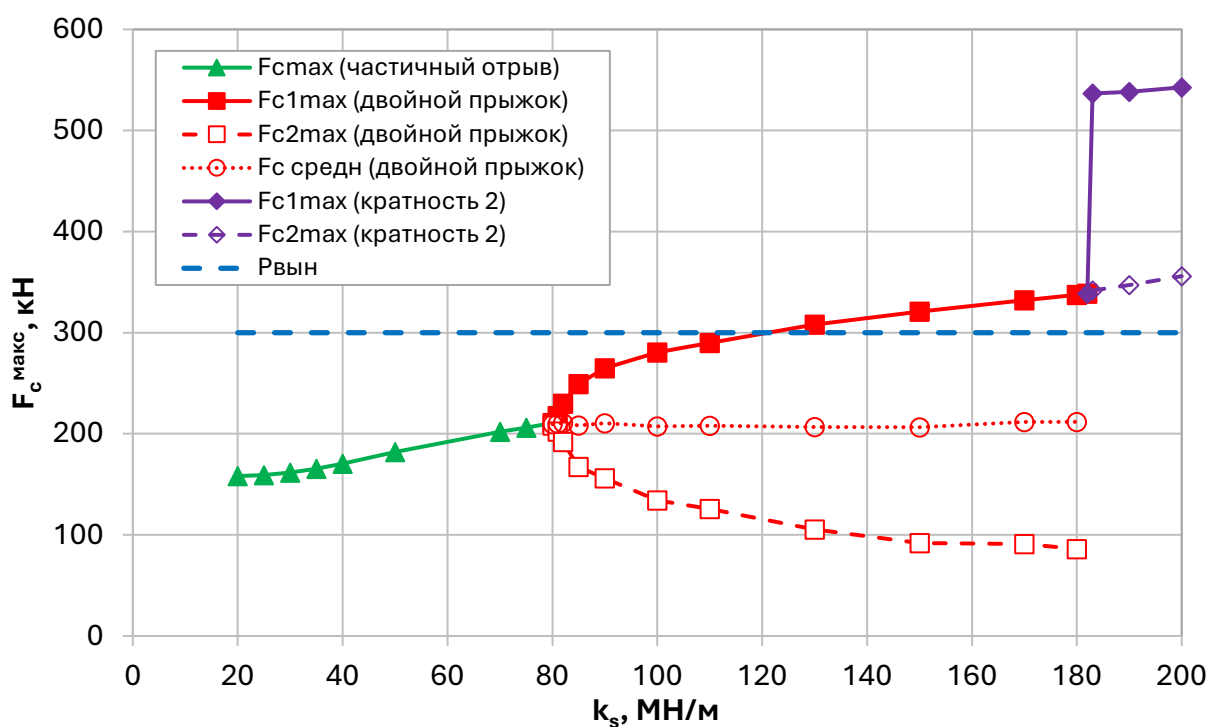


Рисунок 12 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на максимальное значение контактной силы (силы реакции грунта) вальца тестового вибрационного катка при $P = 300$ кН
Источник: составлено автором.

Figure 12 – The effect of changes in soil elastic resistance coefficient k_s on the maximum contact force value (reaction force of the soil) of the roller in the test vibratory roller at $P = 300$ kN
Source: compiled by the author.

Таким образом, получают объяснение рекомендации исследователей [2, 14, 23] и ведущих производителей вибрационных катков^{4,5} о нежелательности реализации режима колебаний «двойной прыжок», поскольку при возникновении данного режима резко возрастают амплитуды колебаний вальца и рамы катка, а также максимальные значения контактной силы (силы реакции грунта), что негативно сказывается на управляемости машины, резко увеличивает нагрузки в элементах конструкции, а также может приводить к разуплотнению и даже разрушению уплотняемого материала. Наиболее эффективна работа вибрационного катка в конечной стадии режима «частичный отрыв» перед переходом в режим «двойной прыжок», поскольку при этом реализуются достаточно высокие значения контактной силы, а размах колебаний вальца и рамы находится в допустимых диапазонах.

В режиме «двойной прыжок» характер изменения значений времени нагружения грунта t_H и времени его разгрузки t_p сложнее, чем в режиме «частичный отрыв». Время нагружения грунта в высокоамплитудной гармонике t_H^{\max} начинает увеличиваться до определенного значения k_s , при котором колебания на низкоамплитудной гармонике начинают осуществляться без отрыва от грунта (см. рисунки 13, 7, 8). Для тестового вибрационного катка с $P = 300$ кН это соответствовало значению $k_s = 110$ МН/м. Затем значение времени нагружения грунта t_H оставалось практически неизменным (на достаточно высоком уровне), вплоть до перехода в режим кратных колебаний. Время нагружения грунта в низкоамплитудной гармонике t_H^{\min} оставалось практически постоянным на уровне, соответствующем времени нагружения грунта в конечной стадии режима «частичный отрыв» (см. рисунок 12). Время разгрузки грунта для высокоамплитудной гармонике t_p^{\max} уменьшалось с затухающей скоростью, в целом продолжая тенденцию, задаваемую значениями t_p в режиме «частичный отрыв» (см. рисунок 14). Время разгрузки грунта для низкоамплитудной гармонике t_p^{\min} вначале несколько увеличивалось, а затем, после перехода колебаний на низкоамплитудной гармонике в безотрывный от грунта режим (при $k_s = 110$ МН/м), начинало уменьшаться,

вплоть до полного исчезновения перед переходом в режим кратных колебаний. Вероятно, это связано с постепенным уменьшением размаха колебаний вальца на низкоамплитудной гармонике.

Переходу в режим кратных колебаний соответствует вторая точка бифуркации, возникающая для используемого тестового вибрационного катка с $P = 300$ кН при значении $k_s = 182$ МН/м. При режиме колебаний кратности 2 в колебаниях вальца также присутствует высокоамплитудная и низкоамплитудная гармоники, но различие между их амплитудами не так значительно, как в режиме «двойной прыжок» (см. рисунок 10). И в целом увеличение размаха колебаний вальца при переходе в режим колебаний с кратностью 2 не так значительно, как при переходе в режим «двойной прыжок». В то время как амплитуда колебаний рамы увеличивается более чем в 2 раза по сравнению со значениями, соответствующему режиму «двойной прыжок» (см. рисунок 11). Также при переходе в режим колебаний кратности 2 существенно возрастает значение F_c^{\max} , которое становится почти в 2 раза больше вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем катка (см. рисунок 12).

Это дает интересную возможность для разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний. Очевидно, что такие машины не могут быть реализованы в виде традиционных самоходных вибрационных катков. Скорее всего, такие машины потребуют разработки специальной компоновки, возможно в прицепном варианте, чтобы исключить передачу высоких значений размаха колебаний рамы на базовую машину. Для уменьшения контактных напряжений при резко увеличившемся значении F_c^{\max} в таких перспективных грунтоуплотняющих машинах необходимо увеличение площади контакта рабочего органа с грунтом, что может быть осуществлено при использовании плоских рабочих органов, аналогичных рабочим органам виброплит.

⁴ Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта. QRБQ 1705. Caterpillar Inc., 2013. 132 с.

⁵ Уплотнение асфальтобетона и грунта. HAMM AG 03.2011 212 4832. 2-е изд., 2011. 142 с.

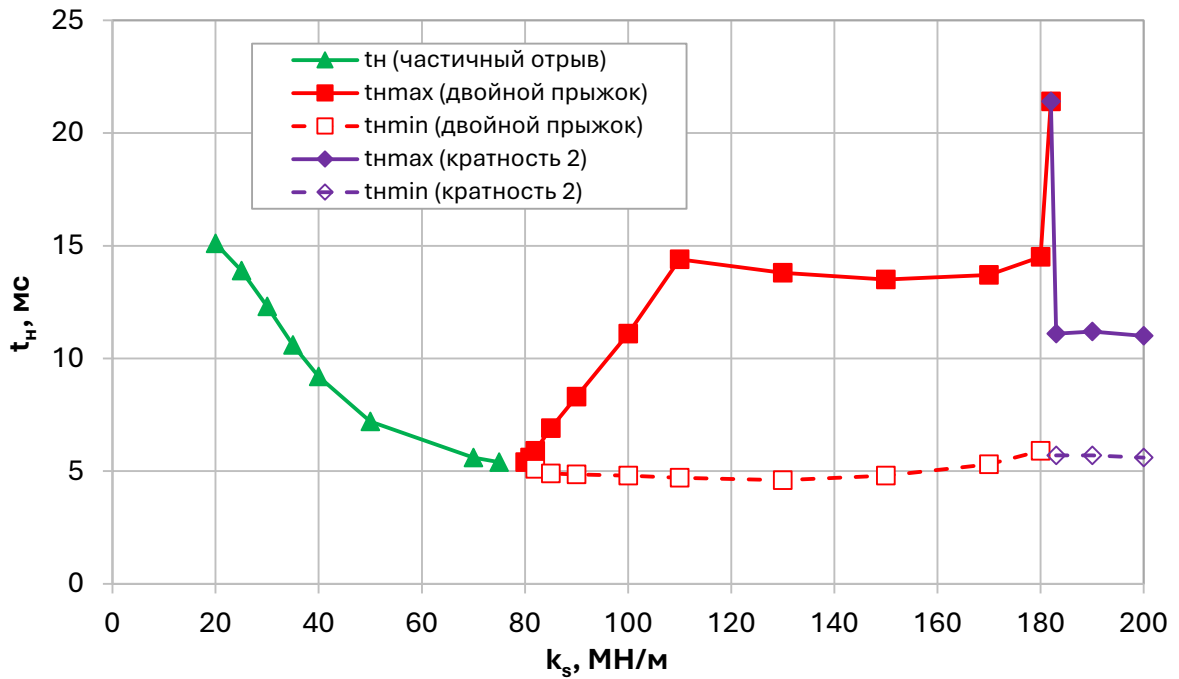


Рисунок 13 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на время нагружения грунта t_n тестовым вибрационным катком при $P = 300$ кН
Источник: составлено автором.

Figure 13 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient k_s on soil loading time t_n for the test vibratory roller at $P = 300$ kN
Source: compiled by the author.

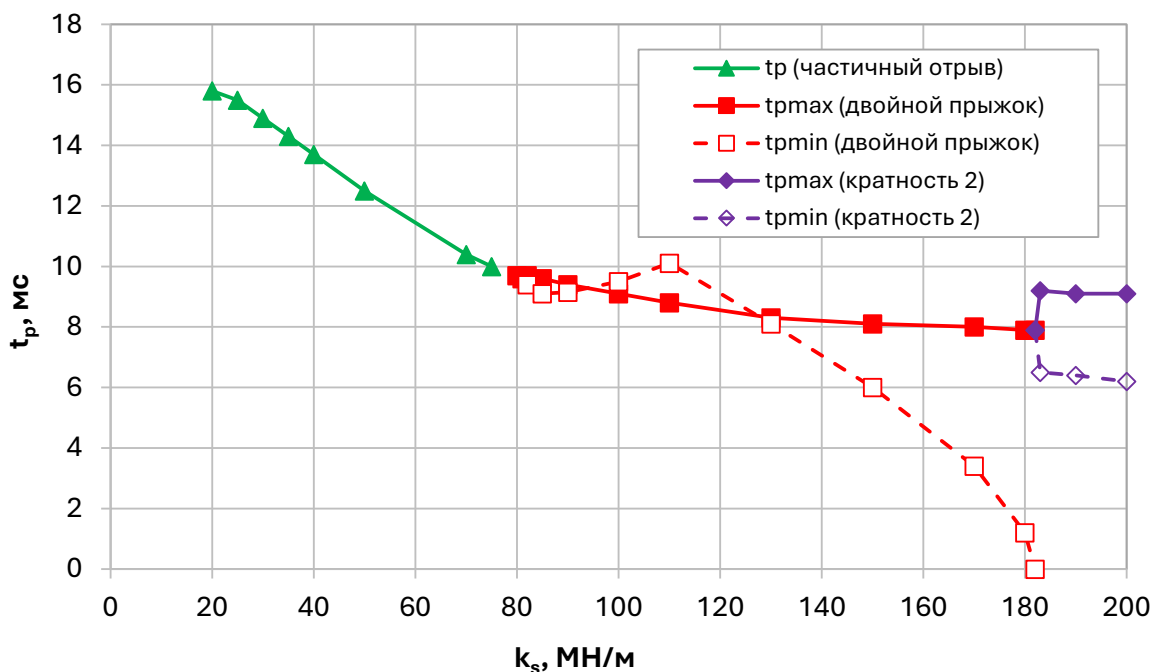


Рисунок 14 – Влияние изменения коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на время разгрузки грунта t_p тестовым вибрационным катком при $P = 300$ кН
Источник: составлено автором.

Figure 14 - The effect of changes in soil elastic resistance coefficient k_s on soil unloading time t_p for the test vibratory roller at $P = 300$ kN
Source: compiled by the author.

Значения продолжительности нагружения и разгрузки грунта в режиме кратных колебаний незначительно меньше, чем в режиме «двойной прыжок» и примерно соответствуют общей продолжительности действия нагрузки, наблюдаемой в режиме «частичный отрыв», что позволяет рассчитывать на достаточно высокую глубину уплотнения грунта перспективными конструкциями грунтоуплотняющих машин, реализующих режим колебаний кратности 2, поскольку глубина уплотнения зависит от общего времени действия контактных напряжений на поверхности грунта [24, 25].

Полученные результаты позволяют расширить понимание влияния характеристик грунта и реализуемых режимов колебаний на изменение максимальной контактной силы F_c^{\max} , продолжительности нагружения t_n и разгрузки t_p грунта, важные с точки зрения методологии расчета влияния технических характеристик вибрационных катков и свойств грунта на распределение напряжений по глубине грунта и достигаемые на различных глубинах деформации грунта после каждого прохода катка [26].

ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что в работах зарубежных авторов встречаются несколько различные точки зрения на названия и характерные особенности некоторых режимов колебаний. Так, D.Adam и M.Mooney [14, 21] к режиму partial uplift относят колебания, при которых валец катка теряет контакт с грунтом в каждом цикле вибрации, не уточняя соотношения амплитуды отскоков на смежных циклах колебаний вальца, а к режиму double jump – колебания, при которых валец катка теряет контакт с грунтом более, чем на 1 цикл вибрации [21], что соответствует режиму колебаний кратности 2, принятому в отечественных исследованиях. В то же время в работе [27] H. Brandl и D. Adam относят к режиму partial uplift колебания, при которых валец повторяет движения в каждом цикле вибрации, а к режиму double jump колебания, при которых валец повторяет движения через 2 или 4 цикла вибрации. Некоторые авторы, используя классификацию режимов D. Adam и M. Mooney [14, 21], внутри режима double jump выделяют подрежимы mild double jump («легкий двойной прыжок») и severe double jump («тяжелый двойной прыжок») [28]. К режиму «легкий двойной прыжок» предлагается относить колебания, при которых амплитуды смежных отскоков неодинаковы и по мере уплотнения грунта возрастает

разница в амплитудах смежных отскоков, то есть классический режим «двойного прыжка». К режиму «тяжелый двойной прыжок» предлагается относить колебания, при которых воздействие на грунт вальца вибрационного катка происходит через каждые 2 оборота вибровозбудителя, что соответствует режиму колебаний кратности 2, принятому в отечественных исследованиях.

В работе [15] авторов R. Anderegg и K. Kaufmann режим double jump называется bouncing. Отмечается, что работа вибрационного катка наиболее эффективна в конце режима partial uplift, непосредственно перед переходом в режим bouncing/double jump [2, 14, 23]. В режиме double jump/ bouncing воздействие вальца на грунт осуществляется с частотой работы вибровозбудителя. Также R. Anderegg и K. Kaufmann рассматривают режим rocking motion («раскачивания») как частный случай режима double jump, реализующийся в случае, когда собственная частота поперечных колебаний вальца меньше, чем частота генерации вынуждающей силы [15]. При этом разность фаз колебаний правой и левой кромки вальца составляет 180° [15]. В противном случае, вероятно, реализуется режим колебаний кратности 2.

Критерии отнесения колебаний к режиму continuous contact у D. Adam и R. Anderegg совпадают.

Таким образом, D. Adam в разных работах относит к режиму double jump режимы, называемые в данной работе «двойной прыжок» и «колебания кратности 2». В то же время R. Anderegg и K. Kaufmann [15] к режиму partial uplift относят только колебания, соответствующие режиму «частичный отрыв», а колебания в режиме bouncing – соответствующие режиму «двойной прыжок» данной работы.

С учетом несколько противоречивых мнений различных исследователей о характерных особенностях реализации различных режимов колебаний вальцов вибрационных катков, а также с учетом результатов исследований автора, в данной работе использовалась классификация режимов колебаний, в которой режиму continuous contact соответствует режим «постоянный контакт», режиму partial uplift соответствует режим «частичный отрыв», режиму double jump/bouncing – режим «двойной прыжок», режиму rocking motion – режим «раскачивания» и «кратные колебания». В данной работе режим «раскачивания» не исследуется, ограничиваясь режимом «кратные колебания». В качестве дополнительного ре-

жима введен режим «кратные колебания». Данная классификация режимов колебаний использует для каждого режима колебаний характерные особенности, наблюдающиеся между точками бифуркации, в которых колебания претерпевают качественную трансформацию и приобретают новые характерные особенности.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе представлена реологическая модель взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой и уплотняемым грунтом, позволяющая учитывать влияние существенных особенностей конструкции и режима работы катка (массу рабочего органа и рамы, частоту колебаний и вынуждающую силу вибровозбудителя, количество и характеристики амортизаторов) и характеристики грунтов (коэффициенты упругого и вязкого сопротивления грунта) на размах колебаний вальца и рамы, а также характер нагружения поверхности грунта.

Разработанная трёхмассная реологическая модель взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» позволяет воспроизводить различные режимы взаимодействия вальца с грунтом: режим постоянного контакта с грунтом, режим частичного отрыва от грунта, режим двойного прыжка, а также более сложные режимы колебаний с кратностью более 1.

Реологическая модель воспроизводит асимметричный характер эпюры контактных напряжений грунта (контактной силы), наблюдаемый в экспериментальных исследованиях [22], что имеет важное значение для последующего анализа влияния продолжительности действия различных значений контактных напряжений на фазах нагружения и разгрузки грунта на глубину распространения волн напряжения в грунте и результирующее распределение напряжений по глубине грунта после каждого прохода катка [26].

Установлены характерные особенности реализации вальцом вибрационного катка различных режимов колебаний и показана необходимость учета реализуемого режима колебаний в качестве одного из ограничений при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков в процессе их проектирования или модернизации, а также в процессе уплотнения грунта.

Расширено понимание влияния характеристик грунта и реализуемых режимов колебаний на изменение максимальной контактной силы F_c^{\max} , продолжительности нагружения t_n и раз-

грузки t_p грунта, оказывающих существенное влияние на глубину распространения напряжений в грунте и достигаемую плотность грунта на глубине. Полученные результаты имеют большое значение для разработки методики обоснования технических характеристик вибрационных катков при их проектировании.

Обоснована возможность разработки перспективных грунтоуплотняющих машин, функционирующих в режиме колебаний кратности 2 и обладающих увеличенной уплотняющей способностью за счет реализации контактной силы существенно большей, чем вынуждающая сила установленного вибровозбудителя колебаний при сравнительной высокой продолжительности действия контактной силы, что обеспечивает повышение глубины распространения напряжений и, соответственно, толщины уплотняемого слоя грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
2. Anderegg R., Dominik von Felten A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. № Jönsson (2006): P. 41.
3. Шишкин Е.А., Савкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53): 36–42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. № 110(8): 1–15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
5. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 3(31): 102–107. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
6. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of Engineering Mechanics. 1996. P. 684–693. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:8\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684))
7. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 26: 60–67. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>

8. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96): 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
9. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров // Вестник СибАДИ. 2017. № 2(54): 28–36. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
10. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // Applied System Innovation. 2020. № 2 (3): 1-10. <https://doi.org/10.3390/asi3020025>
11. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // Springer Proceedings in Physics. 2021. № 251: 359–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1_36
12. Lu Y., Liu J., Zhang J., Wang J. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2023. Vol. 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
13. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. 2004. P. 97–106.
14. Adam D., Pistor J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo. 2016. № Ccc. P. 1–41.
15. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control. // Transportation Research, Record No. 1868. Washington D. C. 2004. P. 124–134.
16. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033>
17. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» // Вестник СибАДИ. 2025; 22(3):396–416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
18. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитический метод исследования вертикальных перемещений виброральца дорожного катка при уплотнении материалов и грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 13–18.
19. Савельев С.В., Михеев В.В., Белодед А.С. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 3(49): 99–105. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
20. Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием: монография. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. 164 с.
21. Mooney M., Rinehart R., Facas N., Musimbi O., White D. [и др.]. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676 Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178 p. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_676.pdf
22. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // Journal of Physics: Conference Series: IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года. Vol. 1546. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012144>
23. Pistor J., Hager M., Adam D., Kopf F., Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems, 17th Nordic Geotechn. Meet. Challeng. Nordic Geotechnic 25 (2016) 865–872. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249454.pdf
24. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
25. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Расчёт распределения напряжений в грунтах с линейным законом изменения плотности по глубине от динамической поверхностной нагрузки // Строительные и дорожные машины. 2013. № 1. С. 40–42.
26. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>
27. Brandl H., Adam D. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // Proc., XIVth Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1, Sept. Hamburg, Ger. 1997. P. 31–36.
28. Fang Z. et al. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction // Autom. Constr. 2022. Vol. 142. P. 104473. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(6):706–716. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

2. Anderegg R., Dominik von Felten A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006; № Jönsson. P. 41.
3. SHishkin E. A., Smolyakov A.A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktnogo usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyaemym materialom // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022; № 1(53). S. 36-42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // *Infrastructures*. 2023; № 110 Vol. 8: 1-15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
5. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noy sistemy "vibratsionnyy rabochiy organ - grunt" // *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; № 3(31):102-107. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
6. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // *Journal of Engineering Mechanics*. 1996. P. 684–693. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:8\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684))
7. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modelirovanie vzaimodeystviya vibratsionnogo val'tsa dorozhnogo katka s uplotnyaemym gruntom // *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2024. № 26: 60-67. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
8. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modeling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(2):202-216. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
9. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Modeling of properties of deformable soil media during compaction by cylindrical roller drums mathematical modeling of compaction for elastoviscoplastic soil media caused by the interaction with work tool of compacting machine in the framework of modified. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(2(54)):28-36. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
10. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // *Applied System Innovation*. 2020;№ 2 (3):1-10. <https://doi.org/10.3390/asi3020025>
11. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // *Springer Proceedings in Physics*. 2021. - № 251. P. 359-366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1_36
12. Lu Y., Liu J., Zhang J., Wang J. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2023. Vol. 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
13. Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // *Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo*. 2016. № Ccc. P. 1–41.
14. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece*. 2004. P. 97-106.
15. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control // *Transportation Research*, Record No. 1868. Washington D. C. 2004. P. 124-134.
16. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller // *Journal of Physics: Conference Series, Omsk*, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033>
17. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(3):396-416. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
18. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analiticheskiy metod issledovaniya vertikal'nykh peremeshcheniy vibroval'tsa dorozhnogo katka pri uplotnenii materialov i gruntov // *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019. № 7: 13-18.
19. Saveliev S.V., Mikheev V.V., Beloded A.S. Mathematical model of denamic deformation of compacted elastic viscous plastic medium. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(3(49)):99-105. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
20. Nosov S.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki nazemnykh transportno-tehnologicheskikh sredstv pri vzaimodeystvii s deformiruемым опорным osnovaniem : Monografiya / Ministerstvo obrazovaniya i nauki rossiyskoy federatsii; lipetskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Lipetsk : Lipetskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2016. 164 s.
21. Mooney M., Rinehart R., Facas N., Musimbi O., White D. [и др.]. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676 - Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178 p. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_676.pdf
22. Tyuremnov I.S., Furmanov D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // *Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference "Mechanical Science and Technology Update"*, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года. Vol. 1546. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012144>

23. Pistol J., Hager M., Adam D., Kopf F., Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems, 17th Nordic Geotechn. Meet. Challeng. Nordic Geotechnic 25 (2016) 865–872. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249454.pdf

24. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi katkami : monografiya Yaroslavl' : Izd-vo YAGTU, 2012. 140 s.

25. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Raschiot raspredeleniya napryazheniy v gruntakh s lineynym zakonom izmeneniya plotnosti po glubine ot dinamicheskoy pov-erkhnostnoy nagruzki // *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2013, № 1, s. 40–42.

26. Tyuremnov I.S. O razrabotke metodologii prognozirovaniya tekhnologicheskikh vozmozhnos-tey udarno-vibratsionnykh gruntuplotnyayushchikh mashin // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024. № 9. S. 689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

27. Brandl H., Adam D. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // Proc., XIVth Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1, Sept. Hamburg, Ger. 1997. P. 31–36.

28. Fang Z. et al. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction // *Autom. Constr.* 2022. Vol. 142. P. 104473. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tyuremnov Ivan S. – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.025
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>
EDN: LKPJBG



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК С УЧЁТОМ УСТОЙЧИВОСТИ

А.О. Тишкова ✉, Н.Н. Якунин, Н.В. Якунина
Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург, Россия
✉ ответственный автор
zvezdynasty8@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие пассажирских автотранспортных систем в городах выдвигает в разряд необходимых решение задачи оценки уровня их организации. Существует проблема избыточного многообразия показателей, используемых для такой оценки. В результате затруднены не только сопоставительный анализ рассматриваемых систем в различных городах, но и выработка направлений развития в отдельно взятом городе. В этой связи разработка методики оценки уровня организации городских регулярных пассажирских перевозок автомобильным транспортом, направленная на решение обозначенной проблемы, является актуальной.

Цель исследования состоит в разработке теоретического и методического инструментария оценки уровня организации городских пассажирских автомобильных перевозок.

Материалы и методы. В работе использованы положения общенаучных методов исследования – анализа и синтеза, математической статистики, в части анализа коллинеарности, мультиколлинеарности и ортогональности показателей, теории транспортных процессов и систем, теории управления, методы экспертных оценок. Используются результаты натурных обследований и сплошного наблюдения, данные открытых информационных систем: официального сайта администрации г. Оренбурга и Росстата, программные StatSoft Статистика и MS Excel.

Результаты. Из существующего многообразия обосновано применение семи показателей и установлено их влияние на оценку уровня организации пассажирских автотранспортных систем. Разработанная для этого математическая модель дополнена показателем устойчивости рассматриваемой системы в условиях наступления возмущающих воздействий не форсмажорного характера. Наибольшая весомость в оценке уровня организации принадлежит показателям «Среднее значение отклонения интервалов движения автобусов от расчётных интервалов в течение суток» и «Доля территории, охваченной маршрутной сетью города».

Заключение. Разработан теоретический и методический инструментарий оценки уровня организации деятельности городских пассажирских автотранспортных систем, работоспособность которого подтверждена на примере г. Оренбурга. Уровень организации составил 0,41 с уровнем устойчивости 0,302 при допустимом значении 0,876.

Направления дальнейших исследований состоят в разработке комплекса методик развития пассажирских автотранспортных систем городов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городские пассажирские автомобильные перевозки, устойчивость, уровень организации городской пассажирской автомобильной сети

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Н.Н. Якунин – член редакционной коллегии журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

Статья поступила в редакцию 15.12.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Тишкова А.О., Якунин Н.Н., Якунина Н.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Тишкова А.О., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Методика оценки уровня организации городских пассажирских автомобильных перевозок с учётом устойчивости // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 62-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>

EDN: LKPJBG

ASSESSMENT METHODOLOGY OF THE ORGANIZATION LEVEL OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION WITH STABILITY CONSIDERATION

Anastasiya O. Tishkova ✉, Nikolay N. Yakunin, Natalya V. Yakunina

Orenburg State University,

Orenburg, Russia

✉ corresponding author

zvezdynasty8@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of passenger motor transport systems in cities makes it necessary to solve the problem of their organization level assessment. There is a problem of an excessive variety of indicators used for such estimation. This complicates not only comparative analysis of the systems under consideration in different cities but also the development of advancement implications in a particular city. In this regard, the elaboration of the methodology for assessing the level of organization of regular urban passenger transportation, aimed at solving this problem, is relevant.

The purpose of the work is to develop theoretical and methodological tools for organization level assessment of urban passenger transport.

Materials and methods. The paper uses the provisions of general scientific research methods - analysis and synthesis, mathematical statistics, in terms of the analysis of collinearity, multicollinearity and orthogonality of indicators, the theory of transport processes and systems, control theory, methods of expert assessments. The results of field surveys and continuous observation surveys, data from open information systems (the official website of the administration of Orenburg city and Rosstat), "StatSoft Statistics" and "MS Excel" software were used.

Results. From the existing diversity, the use of seven indicators has been justified and their impact on the assessment of the organization level of passenger motor transport systems has been established. The mathematical model developed for this purpose is supplemented with an indicator of system stability under conditions of non-force majeure disturbance. The greatest role in estimating the level of organization plays "The average value of the deviation of bus traffic intervals from the calculated intervals during 24 hours" and "The share of the territory covered by the city route network" indicators.

Conclusion. Theoretical and methodological tools for assessing the organization level of the operation of urban passenger transport systems have been developed, the effectiveness of which has been confirmed by the example of Orenburg city. The organization level was 0.41, with the stability level of 0.302, compared to the acceptable value of 0.876.

Areas of further research focuses on the development of a set of methods for the enhancement of urban passenger transportation systems.

KEY WORDS: urban passenger transportation, stability, organization level of the urban passenger road network

CONFLICT OF INTEREST: the authors declare no conflict of interest. N.N. Yakunin member of the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

The article was submitted: December 15, 2025; approved after reviewing: January 21, 2026; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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.

© Tishkova Anastasiya O., Yakunin Nikolay N., Yakunina Natalya V. 2026



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

For citation. Tishkova A.O., Yakunin N.N., Yakunina N.V Assessment methodology of the organization level of urban passenger transportation with stability consideration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 62-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>

ВВЕДЕНИЕ

Городской пассажирский автомобильный транспорт является важной социально значимой отраслью, во многом определяющей социальное и экономическое благополучие населения. Его успешное функционирование зависит от большого количества факторов, эффективность влияния которых на общую удовлетворённость перевозками в должной степени не изучена. Количество известных факторов эффективности немногим меньше ста. В таких условиях возникают затруднения в определении приоритетных направлений развития пассажирских автотранспортных систем, а также в сопоставительном сравнении состояния таких систем в различных городах. Развитие пассажирских автотранспортных систем в городах выдвигает в разряд необходимых решение задачи оценки уровня их организации на основе оптимизированного списка факторов, отвечающего принципам необходимости и достаточности.

Цель работы состоит в разработке теоретического и методического инструментария оценки уровня организации деятельности городских пассажирских автотранспортных систем.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Оптимизирован список показателей, характеризующих городские пассажирские автотранспортные системы.
2. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние оптимизированного списка факторов на оценку уровня организации городских пассажирских автотранспортных систем.
3. Оценка уровня организации дополнена положениями, учитывающими устойчивость их функционирования в условиях возмущающих воздействий не форсмажорного характера.
4. Исследована возможность использования разработанной системы оценки (на примере г. Оренбурга).

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ СТАТЬИ

Успешное развитие городского пассажирского автомобильного транспорта определено

своевременными и эффективными решениями в направлениях организации, технологии и управления транспортным процессом, а также процессами, его обеспечивающими. При этом разделить названные направления часто не представляется возможным. Задача усложняется постоянно меняющейся внешней по отношению к транспорту средой, вызванной не только возросшими требованиями пассажиров, демографическими изменениями, но техническими и технологическими новациями. В наибольшей части работ приведены результаты исследования состояния отдельных аспектов деятельности рассматриваемых систем, а также общие вопросы функционирования этого вида транспорта.

В учебном пособии¹ приведена методика формирования маршрутной улично-дорожной сети городов с учётом временных характеристик пассажиропотоков и протяжённости маршрутов. Методика содержит положения, актуальные в настоящее время. Вместе с тем методика должна совершенствоваться с учётом современных тенденций автомобилизации населения, технологий построения маршрутов, способных повысить уровень организации регулярных пассажирских перевозок.

В работе [1] изучено направление улучшения организации перевозок пассажиров на основе обеспечения приоритетных условий движению городского пассажирского транспорта. В работе [2] обосновано направление совершенствования организации перевозок по принципу согласованного развития подсистем городского пассажирского автомобильного транспорта, включающего подвижной состав, топливно-энергетическое и сервисное обеспечение. В работе [3] исследованы закономерности пространственной неравномерности пассажиропотоков городского пассажирского транспорта, влияние загруженности улично-дорожной сети подвижным составом личного пользования. С учётом этих процессов обоснован комплекс методических решений, направленных на совершенствование деятельности транспорта общего пользования.

Современный и сравнительно точный метод оценки транспортного спроса изучен

¹ Варелопуло Г.А., Антошвили М.Е., Хрущев М.В. Организация городских автобусных перевозок с применением математических методов и ЭВМ. М.: Транспорт, 1974. 104 с.

в работе [4]. Метод состоит в определении корреспонденций пассажиров по операциям валидаций электронных проездных билетов. Автором [5] изучено направление совершенствования организации перевозок пассажиров транспортом общего пользования на основе управления структурой транспортного потока, включая подвижной состав по регулярным маршрутам. Работы [6, 7] содержат результаты исследований, в которых сформулированы и доказаны основные принципы и методологические решения повышения качества перевозок пассажиров. В них основные положения теории квалиметрии адаптированы к отрасли пассажирских перевозок. Публикации [9, 10] содержат новые методы управления городским пассажирским транспортом на основе автоматизированных систем диспетчерского управления и интеллектуальных транспортных систем.

Работы [10, 11, 12, 13, 14, 31, 32, 33] зарубежных авторов затрагивают вопросы организации пассажирских автотранспортных систем городов. В них содержится анализ общественного пассажирского транспорта без интеграции с индивидуальными транспортными системами. Отмечено, что транспорт общего пользования не имеет достаточных возможностей конкурировать с индивидуальным автомобильным транспортом. Lili Chen, Zhijun Yi и Xiaofeng Di уделили внимание коммуникации между департаментами транспорта и управления в различных регионах, разделению задач между ответственными ведомствами, усилению продвижения трансформации пассажирских перевозок. Xinhuan Zhang, Hongjie Liu, Mingming Xu, Chengyuan Mao, Jun-qing Shi, GuolianMeng, Jinhong Wu в работе оценивали удовлетворённость пассажиров перевозками. Результаты их исследований показывают, что модель АНР- EWM является одним из методов определения показателя удовлетворённости пассажиров городской системы общественного транспорта. Модель АНР EWM-FCE применима для оценки удовлетворённости пассажиров системой смешанных общественных перевозок в Нинбо, которая имеет определенную прикладную ценность. В ходе детального анализа их работ, можно сделать вывод, что существует возможность использования перечисленных моделей при организации регулярных пассажирских перевозок в городах России.

В работе [15] изучен новый показатель устойчивости пассажирских автотранспортных систем, отражающий их способность со-

хранять работоспособность в условиях возмущающих воздействий не форсмажорного характера. Авторами работы [16] исследована модель рисков несвоевременного прибытия пассажиров в пункт назначения при регулярных городских перевозках. Доказано, что количественное значение рисков формируется на этапах обследования пассажиропотоков, проектирования перевозок и их реализации.

Методика оценки состояния региональных пассажирских автотранспортных систем исследована в работах [17, 34]. В основу методики положено соотношение количества легкового подвижного состава и парка автобусов, трамваев и троллейбусов, зарегистрированных в регионе. М.Р. Якимов [18] в своей работе отметил значимость управления транспортной системой города и отсутствие чётких критериев оценки её эффективности.

Необходимо отметить труды Ассоциации транспортных инженеров, которая предлагает «Рейтинг городов России по качеству общественного транспорта» [Режим доступа: <https://publictransport.simetrargroup.ru/rating?ysclid=lutoi5ngvj324728606> (дата обращения: 10.11.2025 г.)]. Эта система ранжирования отвечает принципам распределённого оценивания показателей, установленными в соответствии со степенью влияния на привлекательность общественного транспорта. Российская академия транспорта также предлагает «Рейтинг эффективности функционирования городского пассажирского транспорта общего пользования в городах» [Режим доступа: <https://rosacademtrans.ru/itp/reiting-urbantransport/?ysclid=lutoi8dk50260273134> (дата обращения: 10.11.2025 г.)]. Результаты их исследования основаны на анализе большого объёма исходных данных, полученных в результате адресных запросов к органам законодательной и исполнительной власти городов и регионов. Большой объём исходных данных, используемых в этих методиках, требует дополнительного исследования на предмет обоснованности применения, при этом значительная часть данных отсутствует в открытом доступе, что существенно затрудняет её применение.

В работе [20] рассмотрены основные аспекты влияния цифровизации при выполнении транспортных услуг, анализ моделей и механизмов устойчивого развития транспортной системы городов [21], режимы движения автобусов на городских маршрутах в различных погодных условиях и ситуациях [23, 24, 35]. Исследования, представленные в работе

[25], концентрируются на вопросах приспособления логистических механизмов к современным вызовам, среди которых особую роль играют экономические ограничения со стороны недружественных государств. Авторами статьи [26, 27] рассмотрен экологический потенциал транспорта и его характеристик, отвечающих современным требованиям и обеспечению устойчивого развития транспортной инфраструктуры.

В статье [22] предложена классификация обращений граждан, согласно которой к инцидентам по организации перевозок пассажиров отнесены обращения, связанные с изменением показателей работы автобусов, установленные контрактом. Результаты данной работы могут быть использованы при изучении условий наступления возмущающих воздействий не форсмажорного характера, которые оказывают влияние на уровень устойчивости городских пассажирских автотранспортных систем.

В статье [28] авторами исследуется модель, предложенная стандартом «умного» города Британского института стандартов. В анализе использована концепция сочетания количественных и качественных методов для выявления ключевых рамок, определяющих «умный» город. Результаты подтверждают наличие четкой модели, лежащей в основе «умного» города (стандарта), хотя в ней есть существенные недостатки и противоречия. Необходимость активного внедрения мониторинга как управленческого инструмента в процесс развития городов рассмотрена автором статей [29, 30]. Это позволяет создать эффективную информационную поддержку для устойчивого развития современных городов, предложено создание системы мониторинга для эффективной информационной поддержки и транспортной устойчивости систем. Влияние транспортной инфраструктуры и транспорта на устойчивое экономическое развитие рассмотрено в работе [36].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы положения общенаучных методов исследования – анализа и синтеза, математической статистики, в части анализа коллинеарности, мультиколлинеарности и ортогональности показателей, теории транспортных процессов и систем, теории управления, методы экспертных оценок. Используются результаты натурных обследова-

ний и сплошного наблюдения, данные открытых информационных систем: официального сайта администрации г. Оренбурга и Росстата, программные: StatSoft Статистика и MS Excel.

В работе [19] приведена методика формирования списка показателей для оценки уровня организации городских пассажирских автотранспортных систем. Структура методики представлена на рисунке и содержит три уровня: проверка совокупности показателей на коллинеарность (попарное сравнение показателей); корреляционный анализ показателей и проверка мультиколлинеарности показателей; формирование выборки показателей по свойствам ортогональности показателей между собой.

Проверка совокупности показателей на коллинеарность для выявления зависимости между показателями X_i в каждой отдельной группе на основании формул их расчёта позволила исключить взаимозависимые показатели, при этом один из взаимозависимых показателей оставался в выборке. Корреляционный анализ показателей и проверка их на мультиколлинеарность позволили проверить отсутствие взаимозависимостей между показателями X_i от каждой группы.

Результаты применения этих методик позволили оптимизировать список показателей по свойству ортогональности показателей между собой, характеризующих городские пассажирские автотранспортные системы.

В методическом обеспечении решения второй задачи использованы экспертные методы. Анкетирование состояло в определении респондентами весомости влияния показателей, определённых на предыдущем этапе, на уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем. Использовалась 10-балльная шкала. Коэффициент конкордации Кендела составил 0,71, что свидетельствует о достаточной согласованности результатов опроса. Это позволило установить влияния (а) показателей из оптимизированного списка на уровень Y_1 организации городских пассажирских автотранспортных систем в виде математической модели, общий вид которой отражает зависимость 1:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^n a_i X_i, \quad (1)$$

где a_i – аргумент, отражающий долю влияния показателя из оптимизированного списка на уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем;

Многоуровневая система отбора необходимых и достаточных показателей	
Уровень 1	
Уровень 2	Проверка совокупности показателей на коллинеарность (парное сравнение показателей)
Уровень 3	Корреляционный анализ показателей и проверка мультиколлинеарности показателей
	Формирование выборки показателей по свойствам ортогональности показателей между собой

Рисунок – Многоуровневая система отбора показателей для оценки уровня организации регулярных пассажирских перевозок
Источник: составлено авторами.

Figure – Multilevel system for selecting indicators to assess the organization of regular passenger transportation
Source: compiled by the authors.

Y_1 – уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем;

X_i – показатели организации городских пассажирских автотранспортных систем.

Целевая функция $Y_1 \rightarrow 1$. (2)

Разработанная математическая модель оценивает уровень организации работы транспорта общего пользования в стабильных условиях. Однако известны случаи отказа перевозчиков, выигравших конкурсные процедуры и заключивших контракт на выполнение транспортной работы, от исполнения контрактных обязательств. Такие факты оказывают негативное влияние на качество перевозок пассажиров, а потому должны быть учтены при оценке уровня организации работы пассажирских автотранспортных систем. Для определения состояния, при котором пассажирская автотранспортная система будет работать бесперебойно при наступлении возмущающих воздействий, применяют показатель Y_2 устойчивости.

В статье [15] приведена формулировка показателя устойчивости городской пассажирской автотранспортной системы, состоящая в свойстве оставаться в ограниченной области фазового пространства в условиях наступления возмущающих воздействий не форсмажорного характера. К условиям возмущающих воздействий относится наступление событий, состоящих в прекращении выполнения перевозок пассажиров по регулярным маршрутам при отсутствии причин не форсмажорного характера. Приведена методика определения

граничных Удоп значений состояния системы, при которых она может считаться устойчивой. Показатель устойчивости отражает долю спроса на пассажирские перевозки по городским дорогам и улицам, проходящим через транспортные районы с наибольшей плотностью населения, удовлетворяемые перевозчиками, имеющими высокую репутацию и выполняющими условия договоров на перевозки. Показатель устойчивости Y_2 определяют по зависимости

$$Y_2 = \frac{Q_{\text{рейт}}}{Q}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{рейт}}$ – пассажиропоток, который удовлетворяют перевозчики, обладающие доказанной высокой репутацией и обоснованной уверенностью в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта в условиях наступления возмущающих воздействий, пасс.;

Q – общий пассажиропоток в городе, пасс.;

Y_2 – устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы.

При превышении фактического значения показателя Y_2 по отношению к значению $Y_{\text{доп}}$ система считается устойчивой.

С учётом необходимости учёта устойчивости Y_2 уровень организации пассажирской автотранспортной системы оценивают системой уравнений (4):

$$\begin{cases} Y_1 = \sum_{i=1}^n a_i X_i \\ Y_2 = \frac{Q_{\text{рейт}}}{Q} \end{cases}, \quad (4)$$

где a_i – аргумент, отражающий долю влияния показателя из оптимизированного списка на уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем;

Y_1 – уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем;

X_i – показатели организации городских пассажирских автотранспортных систем;

$Q_{\text{рейт}}$ – пассажиропоток, который удовлетворяют перевозчики, обладающие доказанной высокой репутацией и обоснованной уверенностью в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта в условиях наступления возмущающих воздействий, пасс.;

Q – общий пассажиропоток в городе, пасс.;

Y_2 – устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы.

Организация городских регулярных пассажирских перевозок автомобильным транспортом не требует изменений в случае, при котором значения системы уравнений находятся в границах:

$$\begin{cases} Y_1 = 1 \\ Y_2 \in [Y_{\text{доп}}; 1] \end{cases}, \quad (5)$$

где Y_1 – уровень организации городских пассажирских автотранспортных систем;

Y_2 – устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы;

$Y_{\text{доп}}$ – значение состояния системы, при котором она может считаться устойчивой.

В случае если система (5) не выполняется, то организация городских регулярных пассажирских перевозок автомобильным транспортом находится ниже необходимого уровня и требует внесения изменений и корректировок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количество факторов, подвергнутых исследованию согласно приведённой методике, равнялось 87, которые объединены в 7 групп. Из каждой такой группы отобраны X_i показатели (таблица 1).

Таблица 1
Показатели для оценки уровня организации пассажирской автотранспортной системы
Источник: составлено авторами.

Table 1
Indicators for organization level assessment of passenger transportation system
Source: compiled by the authors.

Показатель	Влияние показателя a_i	Наименование	Формула расчёта	Граничные значения для качественной оценки	Описание качественной оценки
$L_{\text{ср}}$	0,124	Среднее расстояние до остановочного пункта, км	$L_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n_{\text{ост.п.}}}$	Не более 0,5 км ^{2,3,4}	Если $L_{\text{ср}} = [0; 0,5]$, то качественная оценка $L_{\text{ср}} = 1$, если $L_{\text{ср}} = (0,5; +\infty)$, то качественная оценка $L_{\text{ср}} = 0$

² Социальный стандарт транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом Распоряжение Минтранса РФ №НА-19-Р от 31.01.2017.

³ Постановление Администрации города Оренбурга от 06.10.2021 №1933-п «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по муниципальным маршрутам регулярных перевозок на территории муниципального образования «город Оренбург» »

⁴ ГОСТ Р 51004–96 Услуги транспортные. Пассажирские перевозки. Номенклатура показателей качества (принят в качестве межгосударственного стандарта ГОСТ 30594–97).

Показатель	Влияние показателя a_i	Наименование	Формула расчёта	Граничные значения для качественной оценки	Описание качественной оценки
K_{FC}	0,148	Соотношение затрат на проезд со средней заработной платой потенциальных пассажиров, в ед.	$K_{FC} = \frac{\overline{FC}}{\overline{F}}$	Не более 0,07 ¹	Если $K_{FC} = [0; 0,07]$, то качественная оценка $K_{FC} = 1$, если $K_{FC} = (0,07; +\infty)$, то качественная оценка $K_{FC} = 0$
ρ_{MTC}	0,138	Плотность маршрутной транспортной сети города, км./кв. км	$\rho_{MTC} = \frac{L_{MTC}}{S_{селит.}}$	Не более 2,5 км/кв. км для крупных городов	Если $\rho_{MTC} = [0; 2,5]$, то качественная оценка $\rho_{MTC} = 1$, если $\rho_{MTC} = (2,5; +\infty)$, то качественная оценка $\rho_{MTC} = 0$
$M_{псм}$	0,147	Среднее количество жителей города, приходящееся на одно пассажирское место в транспортном средстве, чел./место	$M_{псм} = \frac{N}{\sum_{i=1}^n q_i \cdot n_i}$	$= \frac{M_{псм.доп}}{Q_{сут.буд. \mu}}$	Если $M_{псм} < M_{псм.доп.}^1$ то качественная оценка $M_{псм} = 1$, если $M_{псм} > M_{псм.доп.}^1$ то качественная оценка $M_{псм} = 0$
I_{cp}	0,163	Среднее значение отклонения интервалов движения автобусов от расчётных интервалов в течение сут, мин	Определяют в соответствии с нормативом ²	Не более 2 мин	Если $I_{cp} = [0; 2]$, то качественная оценка $I_{cp} = 1$, если $I_{cp} = (2; +\infty)$, то качественная оценка $I_{cp} = 0$
$N_{дтп}$	0,123	Количество дорожно-транспортных происшествий в год с участием общественного пассажирского транспорта, шт.	Определяют по данным официальных сайтов статистики и ГИБДД РФ	Должно быть равно 0	Если $N_{дтп} = 0$, то качественная оценка $N_{дтп} = 1$, если $N_{дтп} > 0$, то качественная оценка $N_{дтп} = 0$
$\omega_{охв. MTC}$	0,157	Доля территории, охваченной маршрутной сетью города, в %.	$\omega_{охв. MTC} = \frac{S_{охв. MTC}}{S_{селит.}} 100\%$	Должно быть не менее 90%	Если $\omega_{охв. MTC} = [0; 90]$, то качественная оценка $\omega_{охв. MTC} = 0$, если $\omega_{охв. MTC} = (90; 100]$, то качественная оценка $\omega_{охв. MTC} = 1$

В таблице использованы следующие обозначения:

L_i – среднее расстояние до ближайшего i -го остановочного пункта в микрорайоне, км;

$n_{\text{ост.п.}}$ – количество остановочных пунктов, шт.;

FC – средние ежемесячные затраты на проезд одного пассажира, руб.;

F – средняя ежемесячная заработная плата, руб.;

$L_{\text{МТС}}$ – длина маршрутной улично-дорожной сети города, км;

$S_{\text{селит.}}$ – селитебная площадь города, км²;

$q_{\text{авт.}}$ – номинальная вместимость автобусов n -го класса, используемых на действующем маршруте согласно реестру, пасс.;

$n_{\text{авт.}}$ – количество автобусов n -го класса, используемых для перевозок пассажиров согласно реестру шт.;

N – количество жителей города, чел.;

$S_{\text{охв.МТС}}$ – площадь города, охваченная действующей маршрутной улично-дорожной сетью, удовлетворяющей нормативу «среднее расстояние до остановочного пункта», км²;

$M_{\text{псм.доп}}$ – допустимое значение показателя «среднее количество жителей города, приходящееся на одно пассажирское место в транспортном средстве» из условия полного удовлетворения транспортного спроса населения в часы пик, чел./место;

$Q_{\text{сут.буд}}$ – городской суточный пассажиропоток в будние дни, пасс./сут;

μ – коэффициент неравномерности пассажиропотока в будние дни в часы пик, ед.

С учётом устойчивости уровень организации пассажирской автотранспортной системы оценивают системой уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = 0,124 \cdot L_{\text{ср}} + 0,148 \cdot K_{FC_{\text{ср}}} \cdot FC_{\text{ср}} + \\ + 0,138 \cdot \rho_{\text{МТС}} + 0,147 \cdot M_{\text{псм}} + 0,163 \cdot I_{\text{ср}} + \\ + 0,123 \cdot N_{\text{дтп}} + 0,157 \cdot \omega_{\text{охв.МТС}} \quad (6) \\ Y_2 = \frac{Q_{\text{рейт}}}{Q} \end{cases}$$

Возможность использования разработанной системы оценена на примере г. Оренбурга. Результаты оценки приведены в таблице 2.

Расчётное значение среднего количества $M_{\text{псм}}$ пассажиров, приходящееся на одно пассажирское место в транспортном средстве, по состоянию на 2024 г. в г. Оренбурге составило 25,1 чел./место.

Значение $M_{\text{псм.доп}}$ определено, исходя из общего городского суточного пассажиропотока и коэффициента неравномерности по часам суток для часа пик. С учётом вышеприведённой формулы для г. Оренбурга $M_{\text{псм.доп}} = 17,05$ чел./место, следовательно фактическое значение $M_{\text{псм}}$ больше допустимого $M_{\text{псм.доп}}$ и качественная оценка показателя $M_{\text{псм}}$ равна 0.

В результате уровень организации городских регулярных пассажирских перевозок автомобильным транспортом в г. Оренбурге по данным на 2024 г. составил:

$$Y_1 = 0,41; Y_2 = 0,302; Y_{\text{доп}} = 0,876.$$

Для г. Оренбурга система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} Y_1 = 1, \text{ не выполняется } Y_1 = 0,41 < 1 \\ Y_2 \in [0,876; 1], \text{ не выполняется } Y_2 = 0,302 < 0,876 \end{cases} \quad (7)$$

Таблица 2
Показатели оценки уровня организации пассажирской автотранспортной системы г. Оренбурга
(по данным на 2024 г.)
Источник: составлено авторами.

Table 2
Indicators for organization level assessment of Orenburg city passenger transportation system
(according to the data for 2024)
Source: compiled by the authors.

Показатель	Влияние показателя a_i	Значение показателя на примере г. Оренбурга	Граничные значения для качественной оценки	Качественная оценка показателя
L_{cp}	0,124	0,47 км	Не более 0,5 км	1
$K_{FC_{cp} \text{ к } F_{cp}}$	0,148	5,25%	Не более 7%	1
P_{MTC}	0,138	2,4 км/кв. км	Не более 2,5 км/кв. км	1
$M_{псм}$	0,147	25,1 чел./место	17,05 чел./место	0
I_{cp}	0,163	7 мин	Не более 2 мин	0
$N_{дтп}$	0,123	5 шт.	0	0
$\omega_{\text{охваченной МТС}}$	0,157	74 %	Не менее 90%	0

На основании полученных решений для г. Оренбурга организация городских регулярных пассажирских перевозок автомобильным транспортом по данным на 2024 г. требует изменений. При этом изменения требуются в направлениях, способных улучшить следующие показатели:

- провозная способность парка подвижного состава пассажирского транспорта, пасс. в сут;
- среднее значение отклонения интервалов движения автобусов от расчётных интервалов в течение суток, мин;
- количество дорожно-транспортных происшествий в год с участием общественного пассажирского транспорта, шт.;
- доля территории, охваченной маршрутной сетью города, %;
- устойчивость пассажирской автотранспортной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют заключить о том, что разработан теоретический и методический инструмент оценки уровня организации городских пассажирских автомобильных перевозок, позволяющий существенно упростить выполнение сопоставительного анализа в различных городах и разрабатывать направления их развития в отдельно взятом городе.

Применение современных методов математической статистики в части анализа коллинеарности, мультиколлинеарности и ортогональности показателей позволило обосновать сокращение их списка для оценки уровня организации перевозок. Оптимизация показателей, характеризующих городские пассажирские автотранспортные системы, проведена путем разделения совокупности показателей на группы и с помощью использования известных математических методов, исключением взаимозависимых показателей в каждой группе до тех пор, пока не останется один показатель от группы, отражающий всю группу в целом. Корреляционный анализ показателей и проверка их на мультиколлинеарность позволили проверить отсутствие взаимозависимостей между показателями от каждой группы.

Разработанная с использованием уточнённого списка показателей математическая модель отражает не только влияние показателей на оценку состояния перевозок, но позволяет вырабатывать направления их развития. Такая математическая модель дополнена показателем устойчивости изучаемых перевозок в условиях наступления возмущающих воздействий не форсмажорного характера. Исследование полученной модели на примере г. Оренбурга свидетельствует о работоспособности данной методики.

Направления дальнейших исследований состоят в создании комплекса методик развития пассажирских автотранспортных систем городов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Котенкова И.Н., Сенин И.С. Методика обеспечения приоритетных условий движения городского пассажирского транспорта // Мир транспорта. 2024. Т. 22, № 2(111): 70–80.
2. Дрючин Д.А. Совершенствование структуры городского пассажирского наземного транспортного комплекса на основе согласованного развития подсистем // Вестник СибАДИ. 2024. Том 21, № 1 (95): 74–87.
3. Цариков А.А. Исследование пространственной неравномерности пассажиропотоков городского пассажирского транспорта // Транспортное машиностроение. 2025. № 3 (39). С. 50–60.
4. Алхуссейни С., Фадеев А.И. Методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов // Вестник СибАДИ. 2022. №19(3): 370–397.
5. Нестеренко Д.Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 90–96.
6. Якунина Н.В. Перевозки пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам: теоретические основы методологии повышения качества // Стандарты и качество. 2015. № 2. С.92–93.
7. Якунина Н.В. Методология повышения качества перевозок пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам: монография. Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. 269 с.
8. Власов В.М., Богумил В.Н., Ефименко Д.Б. Современный облик автоматизированных систем диспетчерского управления городским пассажирским транспортом // Автотранспортное предприятие. 2010. № 1. С. 3–10.
9. Жанказиев С.В., Власов В.М. Научные подходы к формированию государственной стратегии развития интеллектуальных транспортных систем // Автотранспортное предприятие. 2010. № 7: 2–5.
10. Cie śla M.; Ku ´ snierz S.; Modrzik O.; Niedo spiał S.; Sosna P. Scenarios for the Development of Polish Passenger Transport Services in Pandemic Conditions // Sustainability 2021, 13, 10278. P-p. 1–16. <https://doi.org/10.3390/su131810278>
11. Lili Chen, Zhijun Yi, Xiaofeng Di Research and analysis on the transformation of road passenger transport industry // Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1187 (2019) 052065, P-p. 1–5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/5/052065>
12. Zhang X, Liu H, Xu M, Mao C, Shi J, MengG, et al.Evaluation of passenger satisfaction of urban multi-mode public transport // 2020 PLoS ONE15(10): e0241004. P-p. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241004>
13. Michaela Mrníková, Miloš Poliak, Patrícia Šimurková, Salvador Hernandez and Norbert Reuter How Important is the Integration of Public Passenger Transport // LOGI Scientific Journal on Transport and Logistics Vol. 8 No. 2. 2017. P-p. 59–68. <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0017>
14. Jonas Butkevičius The research into the development of passenger transport by land // Transport . 2004. Vol. 19, №5, P-p. 195–201.
15. Тишкова А.О., Паршакова К.А., Бондаренко Н.С., Якунина Н.В., Якунин Н.Н. Устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы // Транспорт Урала. 2025. № 1 (84). С. 72–77.
16. Моргунова И.В., Якунина Н.В., Котов В.В. Модель рисков несвоевременного прибытия пассажиров в пункт назначения при регулярных городских перевозках // Транспорт РФ. 2025. №3 (118). С.50–53.
17. Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Любимов И.И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, результаты исследования // Вестник СибАДИ. 2023. Т.20, № 6 (94). С. 748–761.
18. Якимов М.Р. Роль городского пассажирского транспорта в повышении качества жизни // Мир транспорта. 2015. № 1 (9). С. 80–83.
19. Тишкова А.О., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Система показателей качества для пассажирского автотранспортного комплекса города // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф., Оренбург, 26–27 янв. 2023 г. / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А.В. Пыхтин. Оренбург : ОГУ, 2023. С. 3130–3136. 7 с.
20. Байбик Г.Л., Жильцова О.Н. Основные аспекты влияния цифровизации на внутрироссийский рынок логистических услуг // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № s6. EDN ZRQIJJ
21. Гуськова М.Ф., Ракитин Ф.А. Анализ моделей и механизмов устойчивого развития транспортной системы мегаполиса // Экономические науки. 2023. № 1 (218). С.152–162.
22. Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспетчерского контроля // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 580–593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>. EDN FVTFZG
23. Омонов Б.Ш., Йулдошев Д.Ф., Шамирзаев Э.Х. Влияние погодных условий на режим движения автобусов на городских маршрутах // Экономика и социум. 2023. № 2(105). С.990–999.
24. Omonov B., Shomirzaev E. Influence of weather and climatic conditions on the operation of city buses // Universum: технические науки. 2024.Т.9. №5 (122): С.21–23.
25. Жильцова О.Н., Жильцов Д.А., Арский А.А. Тенденции трансформации транспортной отрасли России в 2025 г. // Вестник евразийской науки. 2025.

T. 17, № s1. URL: <https://esj.today/PDF/48FAVN125.pdf>. (дата обращения: 19.09.2025)

26. Kharlamova Tatiana, Desfontaines Larisa, Barykin Sergey, Gavrilova Rossiniya Prospects for the development of transport infrastructure to ensure sustainable development // X International Scientific Siberian Transport Forum. Transportation Research Procedia 63 (2022) 789–797. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

27. Ikezoe K., Kiriyaama E., Fujimura S. Analysis of car ownership motivation in Tokyo for sustainable mobility service and urbandevelopment. Transp. Policy 2021. 114, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.09.002>

28. Joss S., Cook M., Dayot Y. Smart Cities: Towards a New Citizenship Regime? A Discourse Analysis of the British Smart City Standard. J. Urban Technol. 2017. 24, 29–49. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1336027>

29. Kharlamova T. Monitoring as an instrument of Sustainable Urban Development. MATEC Web Conf. 170, 2018. 02009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817002009>

30. Kharlamova, T., Kharlamov, A., Lemeshchenko, P., 2021. Innovative solutions for forming supply chains in the conditions of economic instability. E3S Web Conf. 258, 06046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125806046>

31. Križnik B. Transformation of deprived urban areas and social sustainability: A comparative study of urban regeneration and urban redevelopment in Barcelona and Seoul. 2018. Urbani izziv 29, 83–95. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2018-29-01-003>

32. Morton C., Mattioli G., Anable J. Public acceptability towards Low Emission Zones: The role of attitudes, norms, emotions, and trust. Transp. Res. Part A Policy Pract. 2021. 150, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.007>

33. Sánchez-García M., Zouaghi F., Lera-López F., Faulin J. An extended behavior model for explaining the willingness to pay to reduce the air pollution in road transportation. J. 2021. Clean. Prod. 314, 128134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128134>

34. Sun W., Wang C., Liu C., Wang L.. High-Speed Rail Network Expansion and Its Impact on Regional Economic Sustainability in the Yangtze River Delta, China, 2009–2018. Sustainability 14, 2021.155. <https://doi.org/10.3390/su14010155>

35. Urien N. Energy Optimization for Public Transportation Applications, in: Automated People Movers and Transit Systems 2013. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. 2013. <https://doi.org/10.1061/9780784412862.031>

36. Wu C., Zhang N., Xu L. Travelers on the Railway: An Economic Growth Model of the Effects of Railway Transportation Infrastructure on Consumption and Sustainable Economic Growth. Sustainability 13, 6863. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13126863>

REFERENCES

1. Konovalova T.V., Nadiryan S.L., Kotenkova I.N., Senin I.S. Methodology for ensuring priority condi-

tions for the movement of urban passenger transport. *Mir transporta*. 2024. Vol. 22, No. 2 (111). P. 70-80. (In Russ.)

2. Dryuchin D.A. Improving the structure of the urban passenger ground transport complex based on the coordinated development of sub-systems. *Vestnik SibADI*. 2024. Vol. 21. No. 1 (95). Pp. 74-87. (In Russ.)

3. Tsarikov A.A. Study of spatial unevenness of passenger flows of urban passenger transport. *Transport engineering*. 2025. No. 3 (39). Pp. 50-60. (In Russ.)

4. Alkhusseini S., Fadeev A.I. Methodology for determining passenger correspondence by public transport from validation operations of electronic travel tickets. *Vestnik SibADI*. 2022. No. 19 (3) p. 370-397. (In Russ.)

5. Nesterenko D.Kh. Study of the influence of the structure of motor transport flow on the efficiency of the use of the road network. *Intellect. Innovation. Investments*. 2019. No. 1. Pp. 90-96. (In Russ.)

6. Yakunina N.V. Transportation of passengers by road on regular routes: theoretical foundations of quality improvement methodology. Standards and quality. 2015. No. 2. Pp.92-93. (In Russ.)

7. Yakunina N.V. Methodology for improving the quality of passenger transportation by road on regular routes: monograph. *Orenburg: IPK University LLC*. 2015. 269 p. (In Russ.)

8. Vlasov V.M., Bogumil V.N., Efimenko D.B. Modern appearance of automated dispatch control systems for urban passenger transport. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2010. No. 1. Pp. 3-10. (In Russ.)

9. Zhankaziev S.V., Vlasov V.M. Scientific approaches to the formation of a state strategy for the development of intelligent transport systems. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2010. No. 7. Pp. 2-5. (In Russ.)

10. Cie śla, M.; Ku ´ snierz, S.; Modrzik, O.; Niedo spiał, S.; Sosna, P. Scenarios for the Development of Polish Passenger Transport Services in Pandemic Conditions. *Sustainability* 2021, 13, 10278. P-p. 1-16. <https://doi.org/10.3390/su131810278>

11. Lili Chen, Zhijun Yi and Xiaofeng Di Research and analysis on the transformation of road passenger transport industry. Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1187 (2019) 052065, P-p. 1-5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/5/052065>

12. Zhang X, Liu H, Xu M, Mao C, Shi J, Meng G, et al. Evaluation of passenger satisfaction of urban multi-mode public transport. (2020) *PLoS ONE* 15(10): e0241004. P-p. 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241004>

13. Michaela Mrníková, Miloš Poliak, Patrícia Šimurková, Salvador Hernandez and Norbert Reuter How Important is the Integration of Public Passenger Transport. *LOGI. Scientific Journal on Transport and Logistics* Vol. 8 No. 2. 2017. P-p. 59-68. <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0017>

14. Jonas Butkevičius The research into the development of passenger transport by land. *Transport* . 2004, Vol. 19, No. 5, R-R 195-201.

15. Tishkova A.O., Parshakova K.A., Bondarenko N.S., Yakunina N.V., Yakunin N.N. Stability of the city passenger motor transport system. *Transport Urala*. 2025. No. 1 (84). Pp. 72-77. (In Russ.)

16. Morgunova I.V., Yakunina N.V., Kotov V.V. Model of risks of late arrival of passengers at their destination during regular urban transportation. *Transport RF*. 2025. No. 3 (118) Pp.50-53. (In Russ.)
17. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Lyubimov I.I. Regional passenger motor transport systems: task statement, research results. *Vestnik SibADI*. 2023. Vol.20. No. 6 (94). Pp. 748-761. (In Russ.)
18. Yakimov M.R. The role of urban passenger transport in improving the quality of life. *Mir transporta*. 2015. No. 1 (9). Pp. 80-83. (In Russ.)
19. Tishkova A.O., Yakunin N.N., Yakunina N.V. System of quality indicators for the passenger motor transport complex of the city. University complex as a regional center of education, science and culture: Sat. materials All-Russia. scientific-method. conf., Orenburg, 26-27 Jan 2023. Orenburg. state. university; ed. A.V. Pykhtin. - Orenburg: OSU, 2023. Pp. 3130-3136. (In Russ.)
20. Baibik G.L., Zhiltsova O.N. Main aspects of the impact of digitalization on the domestic Russian market of logistics services. *Bulletin of Eurasian Science*. 2024. VOL. 16, NO. s6. EDN ZRQIJ (In Russ.)
21. Guskova M.F., Rakitin F.A. Analysis of models and mechanisms of sustainable development of the transport system of the metropolis. *Economic Sciences*. 2023. NO. 1 (218) Pp.152-162. (In Russ.)
22. Trofimova L.S., Gavrilin D. V., Kabzhamitova A. S. Organization of regular passenger transportation, taking into account citizens' appeals and dispatch control. *Vestnik SibADI*. 2024. T. 21, NO. 4 (98). S. 580-593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>. EDN FVTFZG. (In Russ.)
23. Omonov B.Sh. Yuldoshev D.F., Shamirzaev E.Kh. The influence of weather conditions on the mode of movement of buses on urban routes. *Economy and society*. 2023. №2 (105). Pp.990-999. (In Russ.)
24. Omonov B., Shomirzaev E. Influence of weather and climatic conditions on the operation of city buses. *Universum*. 2024. Vol.9. №5(122).Pp.21-23.
25. Zhiltsova O. N., Zhiltsov D.A., Arsky A.A. Trends in the transformation of the transport industry in Russia in 2025. *Bulletin of Eurasian Science*. 2025. VOL. 17. № s1. URL: <https://esj.today/PDF/48FA-VN125.pdf>. (date of treatment: 19.09.2025) (In Russ.)
26. Kharlamova T., Desfontaines L., Barykin S., Gavrilova R. Prospects for the development of transport infrastructure to ensure sustainable development. X International Scientific Siberian Transport Forum. *Transportation Research Procedia* 63 (2022) Pp. 789–797. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
27. Ikezoe, K., Kiriyaama, E., Fujimura, S. Analysis of car ownership motivation in Tokyo for sustainable mobility service and urbandevelopment. *Transp. Policy* 114, 2021. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.09.002>
28. Joss S., Cook M., Dayot Y. Smart Cities: Towards a New Citizenship Regime? A Discourse Analysis of the British Smart City Standard. *J. Urban Technol.* 2017. 24, Pp. 29–49. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1336027>
29. Kharlamova T. Monitoring as an instrument of Sustainable Urban Development. *MATEC Web Conf.* P. 170, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecco-nf/201817002009>
30. Kharlamova T., Kharlamov A., Lemeshchenko P. Innovative solutions for forming supply chains in the conditions of economic instability. *E3S Web Conf.* 2021 258, 06046. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202125806046>
31. Križnik B. Transformation of deprived urban areas and social sustainability: A comparative study of urban regeneration and urban redevelopment in Barcelona and Seoul. *Urbani izziv* 29, 2018. Pp. 83–95. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2018-29-01-003>
32. Morton C., Mattioli G., Anable J., Public acceptability towards Low Emission Zones: The role of attitudes, norms, emotions, and trust. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 2021. 150, Pp. 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.007>
33. Sánchez-García M., Zouaghi F., Lera-López F., Faulin J. An extended behavior model for explaining the willingness to pay to reduce the air pollution in road transportation. *J. Clean. Prod.* 2021. 314, 128134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128134>
34. Sun W., Wang C., Liu C., Wang L. High-Speed Rail Network Expansion and Its Impact on Regional Economic Sustainability in the Yangtze River Delta, China, 2021. *Sustainability* 14, 155. <https://doi.org/10.3390/su14010155>
35. Urien N., Energy Optimization for Public Transportation Applications, in: *Automated People Movers and Transit Systems 2013*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. <https://doi.org/10.1061/9780784412862.031>
36. Wu C., Zhang N., Xu L., Travelers on the Railway: An Economic Growth Model of the Effects of Railway Transportation Infrastructure on Consumption and Sustainable Economic Growth. *Sustainability* 13, 2021. 6863. <https://doi.org/10.3390/su13126863>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Тишкова А.О. Литературный обзор имеющихся научных работ, формирование и обработка выборки показателей, формирование методики и проведение расчётной части исследования.

Якунин Н.Н. Формирование гипотезы, постановка цели и задач работы, окончательное утверждение готовой работы, итоговая подготовка статьи.

Якунина Н.В. Статистическая обработка показателей, расчет показателей по данным сплошного наблюдения.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tishkova A.O. Literary review of scientific works, selection and processing the sets of indicators, methodology development and making calculations for the study.

Yakunin N.N. Hypothesis development, setting goals and objectives of the work, final approval and editing of the article.

Yakunina N.V. Statistical processing of indicators, calculation of indicators based on continuous observation data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тишкова Анастасия Олеговна – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0092-8077>,

SPIN-код: 1335-6434,

e-mail: zvezdynasty8@mail.ru

Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры «Автомобильный транспорт» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6282-2331>,

SPIN-код: 7171-9493,

email: yakunin-n@yandex.ru

Якунина Наталья Владимировна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8895-1307>,

SPIN-код: 4019-0494,

email: nat.yakunina56@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tishkova Anastasiya Olegovna - postgraduate student, Automobile Transport Department, Orenburg State University (13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0092-8077>,

SPIN-code: 1335-6434,

e-mail: zvezdynasty8@mail.ru

Yakunin Nikolay Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Automobile Transport Department, Orenburg State University (13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6282-2331>,

SPIN-code: 7171-9493,

email: yakunin-n@yandex.ru

Yakunina Natalya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Automobile Transport Department, Orenburg State University (13 Prospect Pobedy, Orenburg, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8895-1307>,

SPIN-code: 4019-0494,

email: nat.yakunina56@yandex.ru

Научная статья
УДК 004.94, 656.051
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-76-88>
EDN: TVDGZT



ОРГАНИЗАЦИЯ РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC

Н.И. Соколов, О.А. Шаламова, В.И. Кочергин ✉
Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия
✉ ответственный автор
vkplus2011@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие автомобилизации в Российской Федерации требует оптимальной организации безаварийного дорожного движения, что особенно актуально для городов и городских агломераций с миллионным населением. Решение проблем с возникновением заторов и пробок в крупных населенных пунктах, являющееся характерным и для г. Новосибирска, невозможно без своевременного развития дорожной инфраструктуры и оптимизации управления транспортными потоками на городских магистралях и перекрестках являются различные методы моделирования, способствующие установлению причин формирования заторов на проезжей части и разработке мероприятий по их устранению.

Материалы и методы. Одним из перспективных методов анализа и моделирования транспортных потоков может служить имитационное моделирование в среде AnyLogic. В качестве объекта анализа условий и оптимизации организации движения выбрано пересечение улиц Георгия Колонды – Окружная в г. Новосибирске. Натурным способом на основе видеофиксации произведен сбор объективной информации о количестве транспортных средств, проезжающих через исследуемый перекресток, в утренние и вечерние часы пик.

Результаты. На первом этапе исследований для выбранного перекрестка в среде AnyLogic разработаны исходная и оптимизированная имитационные модели для утреннего и вечернего транспортных трафиков. В результате оптимизационного эксперимента на основе изменения фаз светофорного регулирования предоставляется возможность увеличения пропускной способности перекрестка на 6,6%. Организация реверсивного движения на одной из улиц перекрестка и оптимизация параметров работы светофоров позволит дополнительно увеличить пропускную способность еще на 7,7%.

Обсуждение и заключение. Результаты исследований подтверждают перспективность применения имитационного моделирования в среде AnyLogic для оптимизации параметров светофорного регулирования и целесообразность организации реверсивного движения на высоконагруженных городских магистралях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: имитационное моделирование, реверсивное движение, оптимизационный эксперимент, транспортный поток, интенсивность дорожного движения, дорожный затор, пропускная способность, AnyLogic, перекресток дорог

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензентам, работавшим с данной статьей.

Статья поступила в редакцию 13.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Все 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: Соколов Н.И., Шаламова О.А., Кочергин В.И. Организация реверсивного движения автотранспорта на основе моделирования в среде Anylogic // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 76-88. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-76-88>

© Соколов Н.И., Шаламова О.А., Кочергин В.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-76-88>
EDN: TVDGZT

ORGANIZATION OF REVERSIBLE TRAFFIC BASED ON MODELING IN ANYLOGIC ENVIRONMENT

Nikolay I. Sokolov, Oksana A. Shalamova, Victor I. Kochergin ✉
Siberian Transport University
Novosibirsk, Russia
✉ corresponding author
vkplus2011@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of transport use in the Russian Federation requires the optimal organization of accident-free road traffic, which is especially important for cities and urban agglomerations with a population exceeding one million. Solving problems with the occurrence of traffic congestion and traffic jams in large settlements such as Novosibirsk is impossible without the timely development of road infrastructure and optimization of traffic management. The most promising methods for optimizing traffic flow management on urban highways and intersections are various modeling methods that help to identify the reasons of traffic congestion on the roadway and to develop measures in order to eliminate them.

Research methodology. Simulation in the AnyLogic environment is one of the promising ways for analyzing and modeling traffic flows. The intersection of Georgiy Kolondy and Okruzhnaya streets in Novosibirsk city was chosen as the object of traffic flow condition analysis and optimization. Objective information on the number of vehicles passing through the intersection during the morning and evening “rush hours” was collected by video recording, a natural way of obtaining data.

Results. The initial and optimized simulation models for morning and evening traffic have been developed at the first stage of research for the selected intersection in the AnyLogic environment. As a result of the optimization experiment, based on the change in the phases of traffic light regulation, it has been found the possibility to increase the intersection capacity by 6.6 %. Establishing reversible traffic on one of the intersection streets and optimizing traffic light parameters will additionally increase flow capacity by another 7.7 %.

Discussion and conclusion. The research results confirm the prospects of using simulation modeling in the AnyLogic environment to optimize traffic light control parameters and the feasibility of implementing reversible traffic on heavily loaded urban highways.

KEYWORDS: simulation modeling, reversible traffic, optimization experiment, traffic flow, traffic intensity, traffic congestion, flow capacity, AnyLogic, road intersection

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the reviewers of the article for their hard work and expert opinion.

The article was submitted: November 13, 2025; approved after reviewing: December 16, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Sokolov N.I., Shalamova O.A., Kochergin V.I. Organization of reversible traffic based on modeling in AnyLogic environment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 76-88. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-76-88>

© Sokolov Nikolay I., Shalamova Oksana A., Kochergin Victor I., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Процесс автомобилизации Российской Федерации как сопутствующий эффект развития экономики и повышения благосостояния населения наряду с положительными моментами имеет и отрицательные последствия, такие как увеличение количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), ухудшение экологической обстановки, заторы на дорогах и загромождение улиц припаркованными транспортными средствами. При этом более 70% ДТП происходит в населенных пунктах в первую очередь в крупных городах. Ущерб от дорожно-транспортных происшествий оценивается не только количеством пострадавших участников дорожного движения, но имеет и экономические последствия в виде затрат на лечение и частичной потери производительности активной части населения. Особенно значимым решением проблемы организации безаварийного дорожного движения является для городских агломераций с миллионным населением, причем по мере роста числа автомобилей на дорогах проблемы возникновения заторов и пробок в городах-миллионниках без своевременного развития дорожной инфраструктуры и оптимизации управления дорожным движением будут многократно возрастать.

Данное состояние вопроса представляется особенно характерным для г. Новосибирска, являющегося на сегодняшний момент крупнейшим мультимодальным транспортным узлом Сибирского федерального округа. Существующие планы объединения города и ближайших населенных пунктов в Новосибирскую агломерацию сталкиваются с имеющей место изначальной хаотичной застройкой города, обусловленной особенностями рельефа, и организацией дорожной инфраструктуры г. Новосибирска в соответствии с генеральными планами развития, разработанными еще в период существования Советского Союза и основанными на соответствующих прогнозах численности транспортных средств и населения. Новосибирск, являясь третьим городом страны по численности населения, занимает девятое место в мировом рейтинге городов по загруженности дорожного движения и количеству дорожных заторов, опережая Санкт-Петербург, Токио, Нью-Йорк и другие мировые столицы. Причинами такого состояния дел следует считать разделение города на две части рекой Обь, проблемы организации ремонтно-строительных работ в дорожной отрасли,

отсутствие дальнейшего развития метрополитена, бурный рост жилищного строительства и, соответственно, численности транспортных единиц на душу населения. Наиболее ярко это проявляется в транспортном обеспечении удаленных спальных районов г. Новосибирска.

Для оперативного решения имеющихся проблем требуется проведение комплексных исследований в области управления дорожным движением на основе современных методов анализа дорожной ситуации и моделирования транспортных потоков. Одним из основных мест концентрации ДТП являются перекрестки дорог, оказывающие при возрастании интенсивности дорожного движения значительное влияние на время проезда пересечения проезжих частей и возможные задержки трафика. Только наличие комплексного подхода к организации дорожного движения позволит реализовать создание эффективных, адаптивных и устойчивых транспортных систем, способных не противостоять современным вызовам городской среды и гарантирующих высокий уровень мобильности населения [1]. При этом для оценки параметров транспортного потока должны использоваться современные методы, обеспечивающие измерение и количественную оценку в каждой из транспортных зон, выявление и количественная оценка влияния факторов риска на безопасность движения на перекрестках [2]. Наиболее перспективными методами оптимизации управления транспортными потоками на городских пересечениях проезжих частей являются различные методы моделирования, позволяющие на основе анализа геометрии автострад и городских уличных систем способствовать установлению причин формирования заторов на проезжей части и разработке мероприятий по их устранению. Подобные методы исследования применяются уже в течение длительного отрезка времени в мировой и отечественной практике, однако процессы постоянного развития и изменения дорожной ситуации в каждом конкретном населенном пункте требуют оперативного решения возникающих проблем [3, 4, 5]. Особенно актуальными вопросы использования интеллектуальных технологий представляются в связи с возможностью их использования не только для управления дорожными сигналами на перекрестках, но и при использовании в перспективе дорожной сети наряду с традиционными автомобилями автономными транспортными средствами [6, 7, 8].

Одним из перспективных направлений совершенствования организации городского дорожного движения является использование реверсивных полос. Реверсивное движение представляет собой в достаточной степени эффективный инструмент организации транспортных потоков в условиях ограниченной пропускной способности дорог и высокой интенсивности движения в определенные периоды времени. При использовании реверсивных полос и адекватном оперативном управлении реверсивным движением сокращается время проезда перекрестков и уменьшается количество заторов. Также доказано, что в этом случае снижается уровень стрессовых ситуаций у водителей транспортных средств, что является немаловажным, поскольку личностные качества и показатели психофизиологического состояния водителей в значительной степени влияют на безопасность дорожного движения [9].

Цель настоящего исследования заключается в исследовании перспектив организации реверсивного движения автотранспорта на основе моделирования в среде AnyLogic. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач: анализ транспортных потоков на одном из проблемных перекрестков г. Новосибирска, разработка и анализ имитационных моделей движения транспортных средств в среде AnyLogic, разработка оптимизационных мероприятий и оценка их эффективности, формирование предложений по совершенствованию организации дорожного движения на выбранном перекрестке с использованием реверсивного движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применение среды AnyLogic, объединяющей методы системной динамики и процессного моделирования, является одним из возможных аналитических методов и инструментов имитационного моделирования, позволяющих найти оптимальные решения в заявленной области исследований. Известны примеры успешного применения AnyLogic для моделирования транспортных процессов [10, 11, 12], но каждая конкретная логистическая либо иная аналогичная задача требует индивидуального подхода к анализу и формулировке поставленных задач. В качестве объекта анализа условий и организации движения для достижения поставленной цели выбрано пересечение улиц Георгия Колонды – Окружная в г. Новосибирске [13, 14], представляющее собой одно из немногих возможных ва-

риантов проезда к бурно развивающемуся микрорайону Родники и характеризующееся ежедневным интенсивным движением в часы пик. Альтернативные варианты проезда жителей к спальному микрорайону возможны через улицы Курчатова, Мясниковой, Красных Зорь, Краузе, Рассветная, но наиболее коротким и востребованным маршрутом движения является проезд через перекресток улиц Георгия Колонды – Окружная, являющийся в то же время наиболее проблемным участком. Водители на данном перекрестке прибегают к вынужденному нарушению правил дорожного движения при движении по улице Георгия Колонды, поворачивая налево на улицу Окружную с правой полосы, так как интенсивность движения по левой полосе значительно выше по сравнению с правой полосой, которая перегружена и преимущественно используется водителями маршрутных транспортных средств для поворота направо на улицу Окружную. В итоге создаются аварийные ситуации на перекрестке и заторы по причине несоблюдения рядности движения. Участники дорожного движения, следующие по улице Окружная с улицы Светлановская, не могут выехать на перекресток на разрешающий сигнал светофора ввиду его загруженности. Не следует также оставлять без внимания и перекресток Рекордного переулка, улиц Окружная и Фадеева. Даже помимо времени пиковых значений трафика на участке улицы Окружная между двумя светофорами практически постоянно возникают дорожные заторы. В направлении с улицы Фадеева в сторону улицы Георгия Колонды проблемы движения меньших масштабов благодаря наличию дополнительной секции светофора, согласно которой поворот направо с улицы Окружная на улицу Георгия Колонды разрешен практически постоянно, за исключением того времени, когда пешеходам горит разрешающий сигнал для перехода проезжей части по улице Георгия Колонды. Наблюдения показали, что и в данном случае водители нарушают ПДД и поворачивают без горящей зеленой стрелки светофора, подвергая опасности жизнь и здоровье пешеходов. Схема выбранного перекрестка представлена на рисунке 1, на котором цифрами 1, 2 и 3 условно обозначены направления движения трафика.

Перекресток оснащен средствами светофорного регулирования. Установленный над знаком 2.1 «Главная дорога» знак 8.13 «Направление главной дороги» определяет и указывает поворот налево с улицы Георгия

Колонды на улице Окружную, а также поворот направо с улицы Окружной на улицу Георгия Колонды как направление главной дороги на перекрестке. Соответственно на улице Окружная при движении с улицы Светлановская установлены знаки приоритета 2.4 «Уступите дорогу» и 8.13 «Направление главной дороги», а светофоры оборудованы дополнительной секцией для поворота на улицу Георгия Колонды. Расположенный перед перекрестком на улице Георгия Колонды пешеходный переход обозначен знаком 5.19.1 «Пешеходный переход» и продублирован расположенным на высоте 5 м над дорожным полотном дополнительным аналогичным дорожным знаком. Имеется также разметка 1.14.1 «Пешеходный переход», тротуары от проезжей части отделены ограждениями. Остановочные пункты общественного транспорта, обозначенные знаком 5.16 «Место остановки автобуса», расположены с обеих сторон улицы Георгия Колонды. Длительность интервалов включения разрешающего сигнала для перехода пешеходов через улицу Георгия Колонды со-

ставляет 13 с; для пешеходов, не успевающих завершить переход за указанный промежуток времени, предусмотрен островок безопасности с разметкой 1.16.1. Транспортные потоки попутных транспортных средств разделены разметкой 1.5, для разделения транспортных средств встречных направлений используется разметка 1.3.

Анализ дорожной обстановки на исследуемом перекрестке выявил недостатки организации дорожного движения, связанные с географической удаленностью спального района Родники Калининского района г. Новосибирска от центра города. Загруженность трафика на данном перекрестке зависит от времени суток: в утренние часы дорожный поток сосредоточен на направлении от спального района к центру, а вечером основная масса транспортных средств движется в обратном направлении. Во втором случае определенный прирост трафика в вечерние часы связан с необходимостью проезда жителей Калининского и Зельцовского районов к филиалам гипермаркетов «Лента» и «Лемана ПРО».

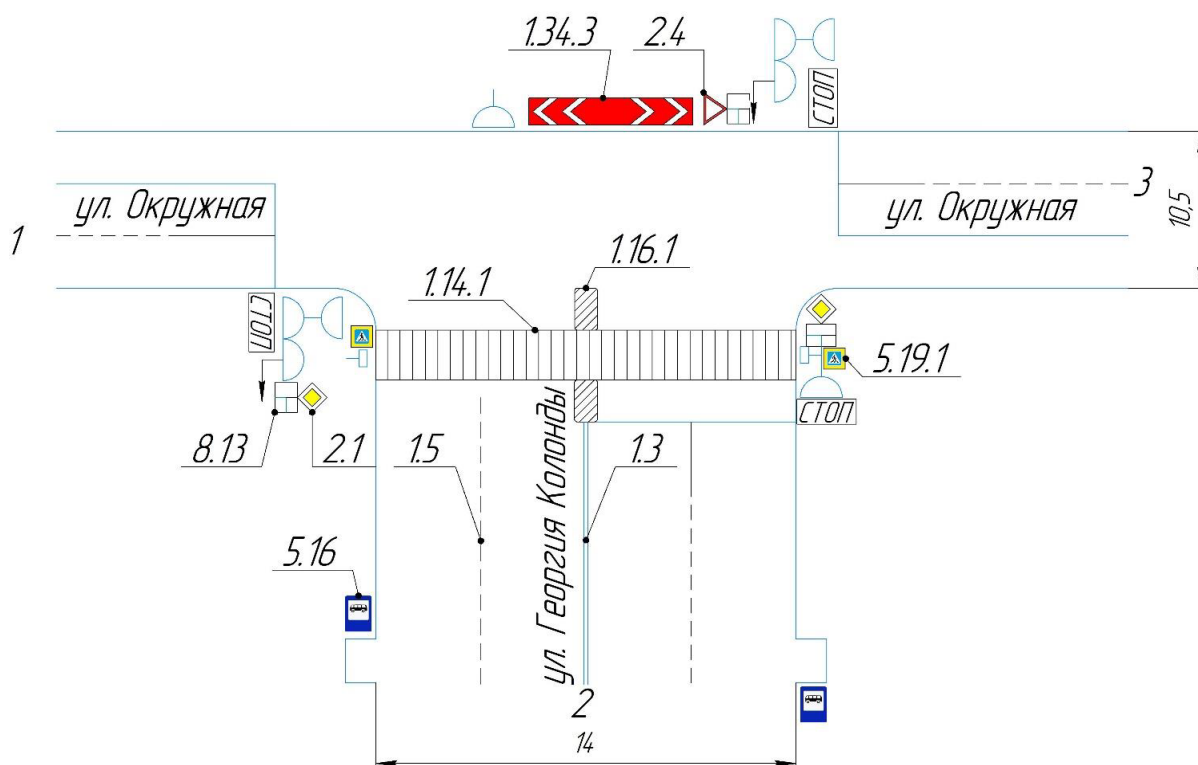


Рисунок 1 – Схема исследуемого перекрестка дорог
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of the investigated road intersection
Source: compiled by the authors.

Таблица

Состав и интенсивность движения транспортных потоков на выбранном участке дорожной сети во время утреннего и вечернего часов пик
Источник: составлено авторами.

Table

Modes and intensity of traffic flows on the selected section of the road network during morning and evening «rush hours».
Source: compiled by the authors.

№ направления	№ полосы	Интенсивность движения транспортных потоков авт./ч							
		Легковые		Грузовые		Автобусы		Автопоезда	
		вечер	утро	вечер	утро	вечер	утро	вечер	утро
1	2	732	639	24	32	8	11	-	4
	3	49	84	44	6	-	3	3	-
2	1	480	823	24	61	10	12	1	-
	3	12	26	5	15	8	5	-	-
3	2	-	1	-	1	4	6	-	1
	1	55	181	16	10	2	-	-	1

Сбор необходимой для аналитических исследований и моделирования параметров транспортных потоков на пересечении улиц Георгия Колонды – Окружная осуществлялся натурным способом на основе видеофиксации. Объективная информация о количестве транспортных средств, проезжающих через исследуемый перекресток, фиксировалась в сентябре 2025 г. в различное время суток, характеризующихся максимальными (пиковыми) значениями трафика: в будние дни в утренний (с 09:00 до 10:00) и вечерний (с 17:20 до 18:20) периоды. В это время автомобильные заторы на анализируемом перекрестке достигали восьми баллов, а их протяженность по направлению от центра к Родникам достигала 570 м. Результаты изучения состава трафика и интенсивности движения транспортных потоков представлены в таблице. В итоге установлено, что в утренние часы средние показатели общей численности транспортных средств на перекрестке составляют 1912 ед., среди которых преобладающее количество среди различных видов автомобильного подвижного состава составляют легковые автомобили в объеме 1754 ед. или же 91,3% от общей численности трафика автотранспорта. Также в транспортном потоке отмечено наличие грузовых автомобилей в количестве 125 ед. (6,5%), автобусов – 37 ед. (1,9%) и автопоездов – 6 ед. (0,3%). В свою очередь, общая численность автомобилей на перекрестке в вечерние часы составила 1477 ед., где также преобладают легковые автомобили в количестве 1328 ед. или 89,9% от общей численности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целевой функцией имитационного моделирования возможных вариантов организации дорожного движения является минимизация времени ожидания проезда перекрестка транспортными средствами T или, соответственно, обеспечение максимальной пропускной способности перекрестка при пиковых значениях трафика, что в первую очередь достигается путем оптимизации длительности фаз светофорного регулирования. Применительно к наиболее загруженным направлениям движения на исследуемом перекрестке при включении разрешающих сигналов светофора со стороны улицы Георгия Колонды и дополнительной секции со стороны улицы Окружная, разрешающей поворот направо (направления движения 2-1 и 1-2), данную целевую функцию можно представить в следующем виде:

$$T(t_{21}, t_{12}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Граничными условиями при оптимизации движения автотранспорта со средней интенсивностью q являются минимальная t_{\min} и максимальная t_{\max} длительность разрешающих сигналов светофоров, определяющие в итоге суммарно возможное количество транспортных единиц M , проезжающих перекресток за полный цикл работы светофоров, которое зависит также от состава транспортного потока и состояния дорожного покрытия:

$$T \geq t_{\min}; (q_{21} + q_{12})t_{\max} \leq M. \quad (2)$$

Кроме того, необходимо учитывать ограничения в виде количества полос n на прилегающих к перекрестку проезжих частях, пригодных для организации реверсивного движения. Указанные ограничения в заданной ситуации при наличии очереди без учета времени подъезда транспортных средств к перекрестку позволяют описать функцию (1) следующим выражением:

$$T = \frac{t_{21}q_{21}}{2} + \frac{t_{12}q_{12}}{n} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Имитационные модели в среде AnyLogic создавались на основе спутниковых снимков местности, позволяющих оценить все нюансы организации движения на выбранном в качестве объекта исследований участке дорожной инфраструктуры. Обе примыкающие к перекрестку проезжие части предназначены для двустороннего движения, причем на улице Георгия Колонды имеется две полосы движения в каждом направлении; на улице Окружной со стороны улицы Фадеева две полосы при движении по направлению к улице Георгия Колонды, а на встречном движении после пересечения с улицей Георгия Колонды – одна полоса. Исходные длительности фаз работы светофоров на перекрестке составляют следующие временные интервалы: $p_1 = 55$ с, $p_2 = 33$ с, $p_3 = 67$ с, $p_4 = 35$ с. Результаты пятичасовой работы исходной имитационной модели с интенсивностью дорожного движения,

полученной в период максимальных значений утреннего трафика, представлены на рисунке 2, а. Среднее время нахождения агента в модели составило 73,688 с, а пропускная способность исследуемого перекрестка за пять часов составила 5640 ед.

Чтобы увеличить пропускную способность, снизить время ожидания разрешающего сигнала светофора на исследуемом перекрестке и устранить причины возникновения утреннего дорожного затора на данном участке дорожной сети, сопровождающегося затрудненным поворотом направо с улицы Окружная на улицу Георгия Колонды, предлагается оптимизировать регулировку фаз и цикла работы светофоров с учетом дорожного движения на пересечении улиц Окружная – Рекордный переулок. В результате проведения оптимизационного эксперимента было воспроизведено 462 итерации (рисунок 2, б), в итоге выбрана итерация с наименьшим средним временем нахождения агента в модели, которое составило 52,618 с фазами работы светофоров, составляющими $p_1 = 60$ с, $p_2 = 22$ с, $p_3 = 64$ с, $p_4 = 18$ с. Пропускная способность дорожного участка за пятичасовой промежуток времени при этом увеличилась до 6014 ед. Таким образом, предлагаемые оптимизационные мероприятия уменьшают среднее время нахождения агента на 29% за 5 ч работы имитационной модели и увеличивают пропускную способность на 374 автомобиля.

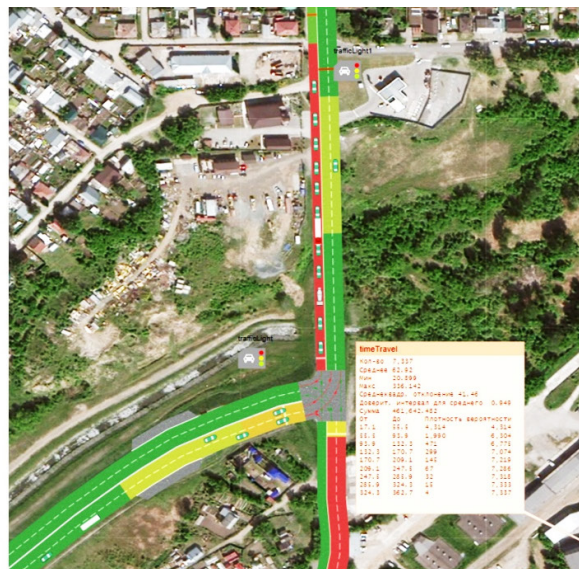


Рисунок 2 – Имитационные модели утренней дорожной обстановки: а – исходная; б – оптимизированная
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Simulation models of morning road conditions: a) initial; b) optimized
Source: compiled by the authors.

Аналогичные исследования по оптимизации имитационной модели были проведены и для вечернего часа пик. Среднее время нахождения агента в результате составило 114,763 с, а пропускная способность перекрестка – 5937 автомобилей. Постоянные затруднения при повороте налево с улицы Георгия Колонды на улицу Окружная в вечерние часы объясняются одновременным возвращением жителей спального микрорайона Родники и прилегающих территорий с работы домой, при этом не наблюдается характерного для утреннего трафика скопления автомобилей с улицы Окружной в направлении улицы Георгия Колонды. С целью минимизации времени проезда и увеличения пропускной способности исследуемого перекрестка на втором этапе исследований в имитационную модель были внесены изменения путем выделения одной из полос по улице Окружная в направлении Рекордного переулка и организации по ней реверсивного движения (рисунок 3).

В настоящее время моделирование транспортных потоков при организации реверсивных полос в среде AnyLogic не нашло широкого распространения. Известные исследования в этой области преимущественно направлены на организацию движения по полосам разгона при выезде с парковочных площадок и при организации въезда на платные участки дорог [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Тем не менее полученные результаты показывают возможность достижения поставленной цели при использовании данного вида программного обеспечения. При имитационном моделировании использовалась компьютерная симуляция, причем предлагаемые модели учитывали различные сценарии изменения направления полос в случае применения реверсивного движения в течение суток, и выполнялся анализ влияния каждого из возможных сценариев на общее состояние транспортной сети.



Рисунок 3 – Исходная имитационная модель с использованием реверсивного движения
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Initial simulation model with the use of reversible traffic
Source: compiled by the authors.



Рисунок 4 – Результаты работы имитационной модели
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Simulation model results
 Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 представлен фрагмент результатов работы имитационной модели и машинные результаты вычислительных экспериментов в виде блок-схем, задающих логику передвижения агентов в модели, и гистограммы, отображающей значения времени проезда агентов через модель и подсчитывающей среднее значение нахождения агента в модели. Использование системной динамики среды AnyLogic при решении таких сложных проблем информационных систем, как оптимизация дорожной сети и организация дорожного движения, является достаточно эффективной парадигмой исследований.

Использование реверсивного движения позволило снизить среднее время ожидания проезда перекрестка на 36,92 с и увеличить число агентов, прошедших в имитационной модели за пять часов на 940 ед. Однако и этот положительный результат можно улучшить, используя подобранные в ходе оптимизационного эксперимента с учетом внедрения реверсивного движения параметры светофорного регулирования с фазами $p_1 = 50$ с, $p_2 = 22$ с, $p_3 = 58$ с, $p_4 = 16$ с. Результаты работы оптимизированной имитационной модели представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Оптимизированная имитационная модель с использованием реверсивного движения
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Optimized simulation model with the use of reversible traffic
Source: compiled by the authors.

Реализация данной модели реверсивного движения требует комплексного подхода, включающего использование современных технологий и инженерно-технических решений, а также ряда технических аспектов, обеспечивающих безопасность и эффективность изменения направления транспортного потока. Основными моментами, которые следует учитывать при проектировании и эксплуатации реверсивных полос, являются:

- использование специальных светофоров с дополнительными секциями, управляющими движением по реверсивным полосам;
- наличие дорожных знаков дорожного движения переменной информации и при необходимости временных дорожных знаков;
- нанесение предусмотренной ГОСТом дорожной разметки;
- эффективная автоматизированная система управления реверсивным движением;
- установка табло и панелей, информирующих водителей о режиме работы полос;
- использование камер фиксации нарушения правил дорожного движения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что введение реверсивной полосы существенно улучшает ситуацию на исследуемом перекрестке г. Новосибирска. В результате анализа разработанной оптимизированной имитационной модели зафиксировано снижение среднего времени задержки проезда перекрестка на 14,92 с и повышение общей пропускной способности перекрестка на 460 автомобилей за 5 ч по сравнению с исходной ситуацией. Анализ также показал, что организация реверсивного движения способна в достаточной степени эффективно решать проблемы дорожных заторов, при этом важнейшим условием его успешного внедрения является точное определение временных интервалов переключения полос и учет особенностей местной дорожной сети. Применение современных технологий моделирования, в том числе в среде AnyLogic, позволяет оптимизировать процесс проектирования и внедрить наиболее эффективные схемы организации дорожного движения.

Полученные результаты имеют значительный потенциал для реализации и могут служить основой для разработки комплексных программ совершенствования транспортной инфраструктуры, включающей модернизацию уличной дорожной сети, развитие общественного транспорта и внедрение интеллектуальных систем управления транспортом. Предлагаемые мероприятия позволят сделать передвижение по городу комфортным и безопасным для всех участников дорожного движения.

Следует учесть, что, несмотря на полученные положительные результаты, разработанная имитационная модель имеет ряд дополнительных ограничений, обеспечивающих корректную интерпретацию выводов и определяющих направления для будущих исследований:

- учет детерминированности и стохастичности поведения агентов (модель предполагает строгое соблюдение правил дорожного движения);
- ограниченный учет состояния внешней среды и дорожного покрытия;
- эффект «узнавания» реверсивной полосы водителями (модель не учитывает период адаптации, при котором часть водителей может поначалу совершать ошибки при переоборудовании);
- решение целого ряда технических аспектов реализации реверсивного движения, таких как установка реверсивных светофоров и информационных табло, нанесение дорожной разметки, наличие технических средств обеспечения безопасности движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа направлена на привлечение внимания к вопросам модернизации городской среды и развития новых подходов к управлению транспортными потоками. Эффективное использование ресурсов городской инфраструктуры способствует улучшению качества жизни населения и повышению привлекательности населенных пунктов для проживания и бизнеса. Результаты исследований подтверждают перспективность применения имитационного моделирования в среде AnyLogic в целях оптимизации параметров светофорного регулирования и организации реверсивного движения на высоконагруженных городских магистралях. Успешное использование предлагаемых подходов к разработке имитационных моделей дорожного движения возможно при условии получения объективных статисти-

ческих данных о времени проезда и пропускной способности анализируемых участков дорожного хозяйства крупных населенных пунктов и городских агломераций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Швецов В.Л. Роль транспортного планирования в интеграционных платформах ИТС: комплексный подход к управлению городской мобильностью // Транспортное дело России. 2025. № 4. С. 141–143.
2. Abdelhalim A., Abbas M. A real-time safety-based optimal velocity model // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. 2021. 3. P. 165–175. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3147744>
3. Zio E., Sansavini G., Maja R., Marchionni G. Analysis of the safety efficiency of a road network: a real case study // R&ATA.2008. 2 (Vol. 1). P. 172–179.
4. Eom M., Kim B. The traffic signal control problem for intersections: a review // European Transport Research Review. 2020. 12 (1): 50. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00440-8>
5. Шаршеева К.Т., Тультемирова Г.У., Алымкулова М.С. [и др.]. Использование метода имитационного моделирования для определения оптимальных режимов работы светофоров на исследуемых перекрестках // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9, № 1. С. 229–237. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/86>
6. Наумова Н.А., Домбровский А.Н., Данович Л.М. Метод управления светофорной сигнализацией в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-1. С. 64–68.
7. Наумова Н.А. Моделирование и оптимизация параметров светофорного регулирования при пересечении многополосных автомобильных дорог // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 8. С. 71–76. <https://doi.org/10.17513/snt.39269>
8. Olstam J., Häll C.H., Bhattacharyya K., Gebrehiwot R. Traffic impacts of dynamic bus lanes: a simulation experiment of real-world bus operations // European Transport Research Review/ 2025. Vol. 17, Article number: 10. <https://doi.org/10.1186/s12544-025-00712-1>
9. Stupin A., Kazakovtsev L., Stupina A. Control of traffic congestion by improving the rings and optimizing the phase lengths of traffic lights with the help of AnyLogic // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 6. P. 1104–1113. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.113>
10. Адаев Р.Б., Ветрова О.А. Применение средств визуализации для задач оптимизации транспортной модели // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 2. С. 22–37. <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.03>
11. Шамлицкий Я.И., Охота А.С., Мироненко С.Н. Сравнение адаптивного и жесткого алгоритмов управления дорожным движением на базе имитационной модели в среде AnyLogic // Программные

продукты и системы. 2018. Т. 31, № 2. С. 403–408. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.031.2.403-408>

12. Bauer V.I., Bazanov A., Kozin E.S., Nemkov V.M. Optimization of technological transport sets using anylogic simulation environment // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019. 42 (2). P. 41–43. <https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2019.41.43>

13. Соколов Н.И., Шаламова О.А. Анализ транспортной ситуации на перекрестках г. Новосибирска. Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. 2 (5). С. 25–29. https://doi.org/10.52170/2712-9195/2022_2_25

14. Sokolov N., Shalamova O., Kochergin V. Optimization of urban agglomeration transport flows // *E3S Web of Conferences* 471 (1). 04025. January 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104025>

15. Talavirya A., Laskin M., Dubgorn A. Application of simulation modeling to assess the operation of urban toll plazas // *Simulation Modeling - Recent Advances, New Perspectives, and Applications*. November 2023. P. 1–39. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002003>.

16. Talavirya A., Laskin M. Simulation modeling of the operation of the toll plaza with reversible lanes // *Wseas transactions on systems*. 2024. Vol. 23. P. 215–222. <https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.24>

17. Chintaman B., Satish C., Ashish D. Estimation of system delay based toll equivalency factors at toll plazas using simulation // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 822–835. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.08.002>

18. Chintaman B., Ashish D., Satish C., Drivers' willingness to shift towards electronic toll collection system in India // *Case Studies on Transport Policy*. 2023. Vol.13. 101046. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101046>

19. Navandar Y.V., Patel D.A., Dhamaniya A., Velmurugan S., Bar Ch. Users perception based service quality analysis at toll plazas using structural equation modeling // *Case Studies on Transport Policy*. 2023. Vol.13. 101053. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101053>

20. Petrovic A., Delibašić B., Nikolić M., Bugarić U. Controlling highway toll stations using deep learning, queuing theory, and differential evolution // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. December 2022. 119 (2). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105683>

REFERENCES

1. Shveczov V.L. Rol' transportnogo planirovaniya v integracionnykh platformakh ITS: kompleksnyj podkhod k upravleniyu gorodskoj mobil'nost'y [The role of transportation planning in intelligent transportation integration platforms: a comprehensive approach to urban mobility management]. *Transportnoe delo Rossii*. 2025; 4: 141–143. (in Russ.)

2. Abdelhalim A., Abbas M. A real-time safety-based optimal velocity model. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2021; 3: 165–175. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3147744>

3. Zio E., Sansavini G., Maja R., Marchionni G. Analysis of the safety efficiency of a road network: a real case study. *R&RATA*. 2008; 2 (1): 172–179.

4. Eom M., Kim B., 2020. The traffic signal control problem for intersections: a review. *European Transport Research Review*. 2020; 12 (1): 50. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00440-8>

5. Sharsheeva K.T., Tul'temirova G.U., Aly'mkulova M.S. et al. Ispol'zovanie metoda imitacionnogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nykh rezhimov raboty svetoforov na issleduemykh perekrestkakh [Use of the simulation method to determine the optimal operation of traffic lights at the intersections under study]. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2023; 9 (1): 229–237. (in Russ.) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/86>.

6. Naumova N.A., Dombrovskij A.N., Danovich L.M. Metod upravleniya svetofornoj signalizaciej v usloviyakh funkcionirovaniya intellektual'nykh transportnykh sistem [Method of traffic light control in operation of intelligent transport systems]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017; 9-1: 64–68. (in Russ.)

7. Naumova N.A. Modelirovanie i optimizaciya parametrov svetofornogo regulirovaniya pri peresechenii mnogopolosnykh avtomobil'nykh dorog [Method of traffic light control in operation of intelligent transport systems]. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*. 2020; 8: 71–76. (in Russ.) <https://doi.org/10.17513/snt.39269>.

8. Olstam J., Häll C.H., Bhattacharyya K., Gebrehiwot R. Traffic impacts of dynamic bus lanes: a simulation experiment of real-world bus operations. *European Transport Research Review*. 2025; 17: 10. <https://doi.org/10.1186/s12544-025-00712-1>

9. Stupin A., Kazakovtsev L., Stupina A. Control of traffic congestion by improving the rings and optimizing the phase lengths of traffic lights with the help of AnyLogic. *Transportation Research Procedia*. 2022; 6: 1104–1113. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.113>

10. Adaev R.B., Vetrova O.A. Primenenie sredstv vizualizacii dlya zadach optimizacii transportnoj modeli [Using visualizers for transport model optimization tasks]. *Nauchnaya vizualizaciya*. 2023; 15 (2): 22–37. (in Russ.) <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.03>.

11. Shamliczkij Ya.I., Okhota A.S., Mironenko S.N. Sravnenie adaptivnogo i zhestkogo algoritmov upravleniya dorozhnym dvizheniem na baze imitacionnoj modeli v srede AnyLogic [AnyLogic adaptive vs. rigid traffic control algorithms]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2018; 31 (2): 403–408. (in Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.031.2.403-408>.

12. Bauer V.I., Bazanov A., Kozin E.S., Nemkov V.M. Optimization of technological transport sets using anylogic simulation environment. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019; 42 (2): 41–43. <https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2019.41.43>

13. Sokolov N.I., Shalamova O.A. Analiz transportnoj situacii na perekrestkakh g. Novosibirsk [Analysis of the transport situation at the intersections of Novosibirsk]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta*. 2022; 2 (5): 25–29. (in Russ.) https://doi.org/10.52170/2712-9195/2022_2_25.

14. Sokolov N., Shalamova O., Kochergin V. Optimization of urban agglomeration transport flows. *E3S Web of Conferences*. January 2024; 471 (1): 04025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104025>

15. Talavirya A., Laskin M., Dubgorn A., Application of simulation modeling to assess the operation of urban toll plazas. *Simulation Modeling - Recent Advances, New Perspectives, and Applications*. November 2023: 1–39. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002003>

16. Talavirya A., Laskin M. Simulation modeling of the operation of the toll plaza with reversible lanes. *Wseas transactions on systems*. 2024; 23: 215–222. <https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.24>

17. Chintaman B., Satish C., Ashish D. Estimation of system delay based toll equivalency factors at toll plazas using simulation. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2023; 12 (3): 822–835. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.08.002>

18. Chintaman B., Ashish D., Satish C., Drivers' willingness to shift towards electronic toll collection system in India. *Case Studies on Transport Policy*. 2023; 13: 101046. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101046>

19. Navandar Y.V., Patel D.A., Dhamaniya A., Velmurugan S., Bar Ch. Users perception based service quality analysis at toll plazas using structural equation modeling. *Case Studies on Transport Policy*. 2023; 13: 101053. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101053>

20. Petrovic A., Delibašić B., Nikolić M., Bugarić U. Controlling highway toll stations using deep learning, queuing theory, and differential evolution. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. December 2022; 119 (2). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105683>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Соколов Н.И. Сбор статистических данных, моделирование транспортных потоков.

Шаламова О.А. Разработка методики проведения исследований.

Кочергин В.И. Организация исследований, редактирование материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sokolov N.I. Statistical data collection, traffic flow modeling.

Shalamova O.A. Development of research methodology.

Kochergin V.I. Organization of research, article material editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Николай Иванович – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9264-8986>,

e-mail: nikolay9947@gmail.com

Шаламова Оксана Александровна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-4072>,

SPIN-код: 3516-6204,

e-mail: oksana.sh73@mail.ru

Кочергин Виктор Иванович – д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-код: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Nikolay Ivanovich – Postgraduate Student, Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9264-8986>,

e-mail: nikolay9947@gmail.com

Shalamova Oksana Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-4072>,

SPIN-code: 3516-6204,

e-mail: oksana.sh73@mail.ru

Kochergin Viktor Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, Transport Engineering Technology and Machine Operation, Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-code: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 666
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>
EDN: WSYLVR



КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ И СИЛИКАТА НАТРИЯ

А.А. Решетова, Э.Н. Медведева ✉, Е.Л. Усова, М.С. Плесовских, О.И. Королева
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия
✉ ответственный автор
medvedevaen1@tyuiu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Главная идея экономики замкнутого цикла заключается в максимальном вовлечении отходов промышленности в производство материалов и снижении доли вовлечения природных ресурсов. Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся при сгорании угля на теплоэнергетических станциях и складированные в золоотвалах, представляют собой перспективное вторичное сырье для получения искусственных керамических заполнителей.

Материалы и методы. В данной работе исследованы физико-химические свойства ЗШО и подобран оптимальный состав на их основе с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего. Методом пластического формования получены цилиндрические образцы, которые были обожжены при температуре 900–1000.

Результаты. Установлено, что с применением в качестве связующего водного раствора силиката натрия с массовой долей 25% можно получить методом пластического формования образцы с прочностью на сжатие 7–9 МПа и средней плотностью 1200–1250 кг/м³, при температуре обжига 950–1000 °С. Полученные характеристики указывают на потенциальную пригодность материала в качестве искусственного керамического заполнителя для бетона.

Обсуждение и заключение. Данный состав впоследствии планируется опробовать в качестве легкого заполнителя в составе бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экономика замкнутого цикла, золошлаковые отходы, искусственный заполнитель, жидкое стекло, силикат натрия, связующий компонент

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

Все 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: Решетова А.А., Медведева Э.Н., Усова Е.Л., Плесовских М.С., Королева О.И. Композиции на основе золошлаковых отходов ТЭЦ и силиката натрия // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 90-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>

© Решетова А.А., Медведева Э.Н., Усова Е.Л., Плесовских М.С., Королева О.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>
EDN: WSYLVR

COMPOSITIONS BASED ON ASH AND SLAG WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS AND SODIUM SILICATE

Antonina A. Reshetova, Elza N. Medvedeva ✉, **Elena L. Usova, Maksim S. Plesovskih, Olga I. Koroleva**
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russia
✉ corresponding author
medvedevaen1@tyuiu.ru

ABSTRACT

Introduction. The main idea of the circular economy is to maximize the use of industrial wastes in the production of materials and reduce the use of natural resources. Ash and slag wastes (ASW), generated during coal firing at thermal power plants and stored in ash-disposal dumps is a promising secondary raw material for the production of artificial ceramic aggregates.

Materials and methods. This study investigates the physicochemical properties of ASW classified as Class F according to ASTM C618, an optimal composition based on these wastes is determined, aqueous sodium silicate solution being used as a binder. Cylindrical samples are produced by plastic molding and fired at temperatures of 900–1000°C.

Results. It has been established that using 25% aqueous sodium silicate solution as a binder by plastic molding can produce samples with a compressive strength of 7–9 MPa and density of 1200–1250 kg/m³ at firing temperatures of 950–1000°C. These characteristics indicate the material's potential suitability as an artificial ceramic aggregate for concrete.

Discussion and conclusion. Further research implies testing this composition as lightweight aggregate in concrete.

KEYWORDS: circular economy, ash and slag wastes, artificial aggregate, liquid glass, sodium silicate, binder

The article was submitted: November 27, 2025; approved after reviewing: January 21, 2026; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Reshetova A.A., Medvedeva E.N., Usova E.L., Plesovskih M.S., Koroleva O.I. Compositions based on ash and slag wastes from thermal power plants and sodium silicate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 90–101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-90-101>

© Reshetova Antonina A., Medvedeva Elza N., Usova Elena L., Plesovskih Maksim S., Koroleva Olga I., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике повторно используется не более 16% золы, полученной от сгорания угля на тепловых электростанциях (ТЭС) [1]. Зола-уноса применяется в качестве компонента для получения различных строительных материалов [2, 3, 4, 5, 6], стеклокерамики [7], керамики на основе карбида кремния [8], в дорожном покрытии [9] в катализе [10, 11], для мелиорации почвы [12], очистки вод от катионов тяжелых металлов [11, 13], синтеза цеолитов [14, 15, 16] и извлечения оксида алюминия [17]. Согласно оценке, представленной в работе [1], к 2030 г. спрос на золу-уноса превысит в 2 раза по сравнению с фактическим объемом получения в 14 млн т. Данное обстоятельство заставляет вовлекать в производство не только золу-уноса, но и золошлаковые отходы, хранящиеся в золоотвалах.

Область применения золы-уноса и золошлаковых отходов определяется их химическим и минералогическим составом. В разных странах существуют различные классификации золы от сгорания угля. В работе [18] представлена обобщенная классификация золы от сгорания угля. Наиболее распространенной является классификация ASTM C618, согласно которой золы по химическому составу подразделяются на классы F и C по суммарному содержанию $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ и уровню CaO. Стандарт ASTM C618 регламентирует применение летучей золы в составах бетонов в качестве непосредственной добавки и не затрагивает золошлаковые отходы, хотя его критерии классификации по содержанию оксидов $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ и CaO используются в зарубежной научной литературе для конкретизации алюмосиликатного состава золы и золошлаковых смесей.

В России для золы-уноса, а также шлаков и золошлаковых смесей тепловых электростанций (ТЭС), вводимых в состав бетона в виде добавок без обжига, действует ГОСТ 25592–2019, а для обжиговых технологий с участием отходов ТЭС применим ГОСТ Р 57789–2017.

Повторное использование золы и золошлаковых материалов в качестве перспективного сырьевого источника соответствует идее экономики замкнутого цикла, цель которой заключается в максимальном вовлечении отходов промышленности в производство новых материалов и снижении доли применения природных ресурсов.

Одним из самых материалоемких отраслей является строительство, где наиболее вос-

требуемым материалом значится бетон на основе цемента [19]. Производство цемента является весьма энергозатратным и сопряжено с большими выбросами углекислого газа в атмосферу [20]. Поэтому замена цемента в составах строительных материалов другими компонентами, в частности золой-уноса, способствует снижению экологической нагрузки, а также себестоимости продукции.

Существует два альтернативных способа введения золы в состав цементных изделий:

- замена собственно цемента золой (применяют золы с высоким содержанием CaO);
- введение пористых заполнителей (применяют золы с низким содержанием CaO).

Пористые заполнители подразделяются на природные, такие как пемза, вулканический туф, отходы деревообрабатывающей промышленности (опил, щепа, стружка) и т.д., и искусственные, представляющие собой вспененный полистирол, пеностекло, керамзитовый гравий и песок [21, 22, 23, 24].

Перспективным является использование пористых заполнителей в составе бетонов при малоэтажном строительстве. Пористый гравий любой природы позволяет улучшить теплотехнические характеристики материала и снизить нагрузку на конструкцию. Керамический заполнитель обладает огнестойкостью и имеет преимущество перед щебнем, который состоит из минералов с различным температурным расширением, что может привести к растрескиванию материала при высоких температурах [25].

Таким образом, цель данного исследования – разработка составов керамического заполнителя на основе золошлаковых отходов ТЭС с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего компонента, а также изучение физико-механических характеристик для потенциального применения в качестве искусственного заполнителя в конструкционных или конструкционно-композиционных бетонах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В технологии производства керамического заполнителя были использованы золошлаковые отходы Томской ГРЭС-2 (ЗШО). Пробы были отобраны из 5 точек из золоотвала, находящегося рядом с р. Ушайкой. Для оценки пригодности ЗШО определены гранулометрический, минералогический и химический составы, а также была оценена морфология частиц.

Распределение частиц по размерам ЗШО определяли с помощью лазерного анализатора частиц (ANALYSETTE 22 NeXT Nano).

Минералогический состав ЗШО установили методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-6 при 40 кВ и 40 мА, излучением $\text{CuK}\alpha$ с фильтром Ni (k 1,5406 Å).

Морфологию частиц золошлакового материала исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JCM-6000 с EDS-приставкой, при помощи которой энергодисперсионным анализом определили элементный состав материала, а по нему рассчитали оксидный состав ЗШО.

Дальнейшее исследование заключалось в подборе оптимальной концентрации силиката натрия в качестве связующего компонента для формирования образцов пористого заполнителя. Готовились водные растворы силиката натрия с массовой долей 5, 10, 25, 50%. С этой целью в состав золошлакового материала в количестве 30 г вводили растворы силиката натрия различной концентрацией объемом 17 мл. В работе использовали силикат натрия фирмы «ОПТИМАСТЕР» (г. Пермь) с плотностью 1,470 г/см³ и силикатным модулем 2,5.

Для каждого состава с содержанием раствора силиката натрия в количестве 5, 10, 25 и 50 мас.% методом пластического формования были изготовлены цилиндрические образцы диаметром и высотой 20 мм (по 5 параллельных образцов на каждый состав и температуру обжига).

Для установления оптимальной концентрации силиката натрия на сухих образцах определяли прочность на сжатие. Образцы с оптимальной прочностью в сухом состоянии обжигались при температурах 900, 950, 1000 °С. После обжига на полученных образ-

цах определяли величину водопоглощения, прочность на сжатие на приборе ПРГ-50.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рентгенофазовый анализ золошлаковых отходов ТЭС (рисунок 1) выявил наличие кристаллических фаз кварца (JCPDS Card No. 46-1045), муллита (JCPDS Card No. 15-0776) и гематита (JCPDS Card 000-33-0664), а также в интервале углов $2\theta=20-30$ фиксируется широкое диффузионное гало, что свидетельствует о большом присутствии аморфной стеклофазы. Полученные данные хорошо согласуются с данными фазового состава золы, представленные в работах [26, 27, 28].

Микроструктура ЗШО, исследуемая методом сканирующей электронной микроскопии (рисунок 2), состоит из частиц микросфер различного диаметра и частиц неправильной формы. Микросферы имеют гладкую поверхность и представляют собой алюмосиликатное стекло, образующееся при расплавлении породы в печи. Частицы неправильной формы представляют собой остатки несгоревшего угля либо частицы тугоплавких веществ. Полученные данные хорошо согласуются с данными в работе [29].

Энергодисперсионный анализ позволил установить оксидный состав ЗШО: 48–52%, 36–40%, – 3–6%, $\text{CaO} < 5\%$, все остальное приходится преимущественно на примесные оксиды щелочных металлов (Na_2O , K_2O).

Потери массы при прокаливании составили около 11 мас.%, что обусловлено сгоранием остаточного угля (несгоревшего топлива) и органических веществ. Содержание соединений серы, в т.ч. сульфидной серы в данной работе не определялось.

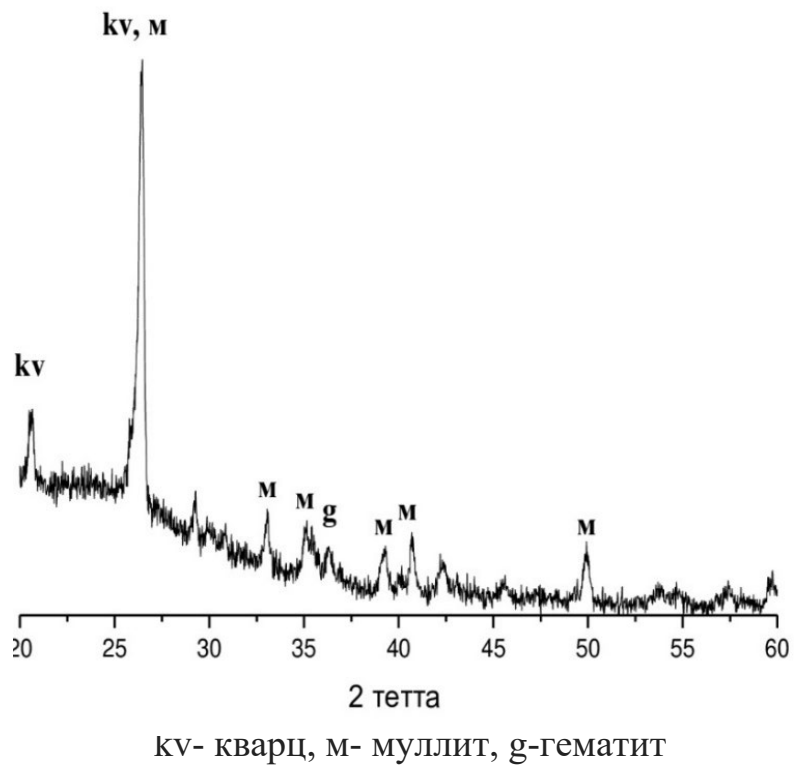


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма исследуемого золошлакового материала
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – X-ray diffraction pattern of the ash and slag material under study
Source: compiled by the authors.

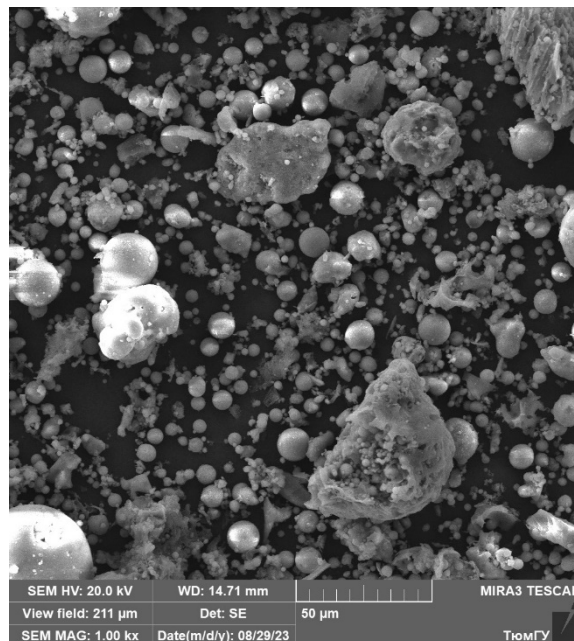


Рисунок 2 – СЕМ снимок золошлакового материала
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scanning electron microscope image of ash and slag material
Source: compiled by the authors.

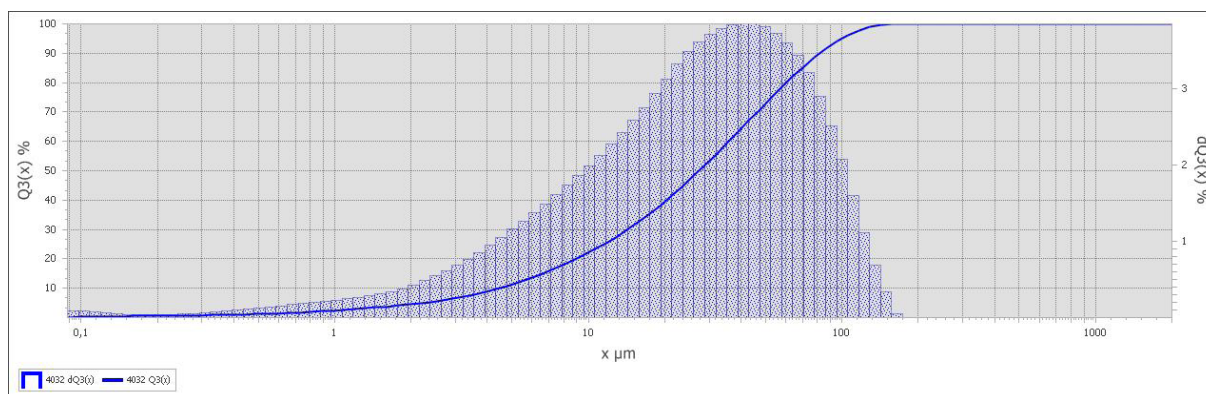


Рисунок 3 – Гранулометрический состав исследуемых ЗШО
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Granulometric composition of the ash and slag waste
Source: compiled by the authors.

Гранулометрический состав золошлакового материала (рисунок 3) позволил установить средний диаметр частиц ЗШО порядка 27 мкм.

Технология получения пористого керамического заполнителя на основе ЗШО включает следующие стадии: сушка ЗШО, при необходимости измельчение, введение связующего компонента, формование гранул, сушки и обжига гранул [30].

Основываясь на полученных данных гранулометрического состава ЗШО (средний диаметр частиц порядка 27 мкм, см. рисунок 3), было установлено, что возможно исключить стадию измельчения материала на подготовительном этапе.

В качестве связующего компонента использовали водный раствор силиката натрия вводимого в количестве 5, 10, 25 и 50 мас.%. Из полученных шихт методом пластического формования были изготовлены цилиндрические образцы диаметром и высотой 20 мм (по 5 образцов на каждый состав). С целью прогнозирования поведения гранулированного материала при транспортировке в печь обжига на сухих цилиндрах определялась прочность на сжатие. Как показано на рисунке 4 прочность сухих образцов закономерно увеличивается при увеличении количества силиката натрия в составе связки, одновременно при этом увеличивается и время сушки материала, что удлиняет цикл получения заполнителя.



Рисунок 4 – Зависимость прочности сухих образцов от концентрации силиката натрия в связке
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence between dry samples strength and sodium silicate concentration in the binder
Source: compiled by the authors.

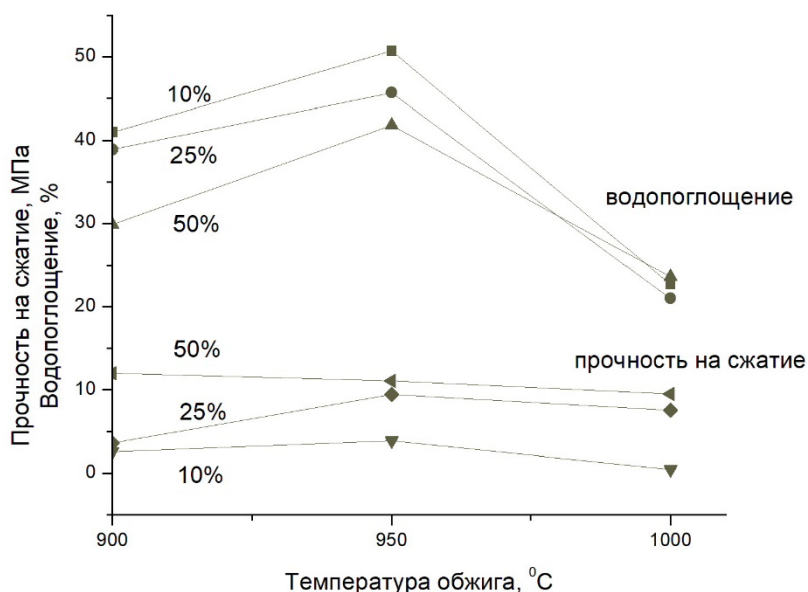


Рисунок 5 – Зависимость величины водопоглощения и прочности на сжатие от температуры спекания и концентрации силиката натрия в составе связки
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence between water absorption, compressive strength and sintering temperature, sodium silicate concentration in the binder
 Source: compiled by the authors.

Для последующего обжига были отобраны составы, полученные на связке с концентрациями силиката натрия 10, 25, 50%. Зависимости прочности на сжатие и величины водопоглощения от количества силиката натрия в составе связки при различных температурах обжига представлены на рисунке 5.

Как видно из полученных зависимостей, содержание в составе связки силиката натрия сказывается на свойствах композиций.

Наибольшая разница в величине водопоглощения исследуемых составов отмечается при температуре 900 и 950 °C и практически имеет сопоставимое значение при 1000 °C. При одной и той же температуре обжига составы с меньшей концентрацией силиката натрия имеют большее значение величины водопоглощения. При повышении температуры обжига от 900 до 950 у всех составов отмечается максимальное значение водопоглощения в диапазоне 42–53%, что возможно связано со снижением вязкости образующегося расплава в совокупности с интенсивным выделением газообразных веществ, в т.ч. от сгорания угля.

Образцы, приготовленные с содержанием 50% силиката натрия и обожженные при 1000 °C, имеют оплавленную поверхность. В то время как образцы, содержащие меньше сили-

ката натрия в составе связки, имеют шероховатую поверхность при той же температуре.

Исследование зависимости прочности образцов от температуры обжига и концентрации силиката натрия в связующем показало, что при одинаковых температурах обжига прочность составов увеличивается с увеличением концентрации силиката натрия.

Изменения прочности образцов во всем интервале температур спекания (900–1000 °C) показало, что прочность образцов с различным содержанием силиката натрия практически не изменяется за исключением состава, содержащего 25%. В данном составе прочность образцов при температуре 900 °C сопоставима с составом с меньшим содержанием силиката натрия, а при температуре 950 и 1000 °C прочность сопоставима с прочностью составов с более высоким содержанием силиката натрия. Для составов, полученных при содержании силиката натрия в связующем компоненте 25% и обожженных при температуре 950 и 1000 °C была определена средняя плотность, которая составила 1200 и 1250 кг/м³ соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования химико-минералогического состава и морфологии частиц ЗШО подтвер-

дили алюмосиликатный состав с низким содержанием оксида железа, а также щелочных и щелочноземельных оксидов. Содержание следующих оксидов соответствует требованиям ГОСТ Р 57789–2017. Имеются отклонения по содержанию оксида алюминия (36–40%) и количества несгоревшего топлива, оцененного по потере при прокаливании, которая составила около 11%. В ГОСТ Р 57789–2017 предусмотрено отклонение для оксида свыше 20% и для остаточного углерода до 15% в случае получения высокопрочных заполнителей, зольного аглопорита. Таким образом, исследуемый ЗШО, несмотря на отклонения от рекомендуемых значений, соответствует требованиям ГОСТ Р 57789–2017, что предопределяет его применение в качестве сырьевого источника для получения искусственных пористых заполнителей.

Введение в виде связующего вводного раствора силиката натрия разной концентрации на стадии формования образцов оказывает существенный упрочняющий эффект с увеличением содержания силиката натрия до концентрации 50%. Данный факт связан с увеличением солевых мостиков силиката натрия при высыхании связующего. Оптимальное содержание силиката натрия в составе связки должно находиться в пределах 25 мас.%, т.к. повышение количества связки приводит к росту прочности изделия, но способствует появлению излишка связующего на поверхности образцов. Это увеличивает вероятность слипания гранул в процессе гранулирования и при транспортировке, а меньшее количество силиката натрия может привести к разрушению гранул при транспортировке до стадии обжига.

Исследование процесса спекания полученных образцов показал, что увеличение содержания силиката натрия также положительно сказывается на упрочнении и уплотнении образцов. При температуре обжига 950 °С наблюдается рост значения водопоглощения у всех образцов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что при температуре 900 °С образуется расплав, в результате активизируется процесс спекания образцов, и с увеличением температуры до 950 °С количество расплава увеличивается, а его вязкость понижается. Одновременно с этим в массиве образца происходит выделение оксида углерода, молекулы которого разрывают маловязкий расплав и, как следствие, увеличивается открытая пористость образцов. Увеличение температуры обжига до 1000 °С сопровождается дальнейшим

ростом доли расплава и частичного закрытия пор, о чем свидетельствует снижение величины водопоглощения. Оплавление поверхности образцов, полученных с применением связки силиката натрия 50%, косвенно свидетельствует о взаимодействии силиката натрия с кремнеземистыми компонентами золошлакового материала и появлении легкоплавких эвтектик.

Содержание силиката натрия в составе связки существенным образом сказывается на увеличении прочностных характеристик изделий во всем диапазоне температур обжига. При температуре обжига 1000 °С у всех составов наблюдается незначительное снижение прочности, что связано с увеличением доли стеклофазы, по которой, как правило, и идет разрушение материала. При этом необходимо отметить, что прочность образцов при температуре обжига 950 °С, содержащих в составе связки 25 и 50% силиката натрия, отличаются не более чем на 20%, что вероятней всего связано с увеличением количества расплава в составе образцов. Достаточно высокие значения водопоглощения у всех составов при температуре обжига 1000 °С свидетельствуют о незавершении процесса спекания, однако дальнейшее повышение температуры экономически нецелесообразно. В работе [31] авторы приводят информацию, что наличие открытой пористости является преимуществом, т.к. раствор цемента может проникать в поры заполнителя и скреплять его, что также дает увеличение прочности. Таким образом, высокая открытая пористость может потенциально способствовать улучшению сцепления с цементным камнем, но данный аспект в этой работе не исследовался и требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был разработан состав керамического заполнителя на основе золошлаковых отходов ТЭС с применением водного раствора силиката натрия в качестве связующего компонента, а также изучены физико-механические характеристики для потенциального применения в качестве искусственного заполнителя в бетонах.

Установлено, что по химическому составу ЗШО пригоден для получения искусственных пористых заполнителей.

Учитывая гранулометрический состав ЗШО (средний размер частиц составляет 27 мкм) возможно исключить стадию предварительного измельчения в технологическом цикле.

Установлено, что оптимальной концентрацией водного раствора силиката натрия является 25%, что обеспечивает достаточную прочность образцов, необходимую для транспортировки сухих образцов, кроме того отсутствие избытка связующего на поверхности снижает риск слипания гранул.

При температуре обжига 950 °С всех составов наблюдается максимальное значение водопоглощения до 40–53%, что связано с влиянием пониженной вязкости расплава и интенсивного газовыделения из-за сгорания остаточного углерода, находящегося в составе ЗШО.

Установлено, что с применением в качестве связующего водного раствора силиката натрия с массовой долей 25% можно получить методом пластического формования образцы с прочностью на сжатие 7–9 МПа и средней плотностью 1200–1250 кг/м³, при температуре обжига 950–1000 °С. Полученные характеристики указывают на потенциальную пригодность материала в качестве искусственного керамического заполнителя для бетона. Данный состав впоследствии планируется опробовать в качестве легкого заполнителя в составе бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baran P., Sobala J., Szczerowski J., Zarębska K. Management of fly ash to synthesise geopolymers and zeolites // *Energies*. 2023. Т. 16. №. 23: С. 7888. <https://doi.org/10.3390/en16237888>
2. Dash S., Panda L., Mohanty I., Gupta P. Comparative feasibility analysis of fly ash bricks, clay bricks and fly ash incorporated clay bricks // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Т. 115. №. 7: С. 11502. <https://doi.org/10.34910/MCE.115.2>
3. Nayak D.K., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies // *Cleaner Materials*. 2022. Т. 6: С. 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
4. Tian Y., Bourtsalas A., Kawashima Sh., Themelis N.J. Using Waste-to-Energy Fine-Combined Ash as Sand or Cement Substitute in Cement Mortar // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023. Т. 35. №. 11: С. 04023378. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15684>
5. Tian Y. Characterization, stabilization, and utilization of waste-to-energy residues in civil engineering applications. Columbia University, 2022.
6. Vakalova T.V., Revva I. B. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures // *Construction and Building Materials*. 2022. Т. 317: С. 125922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>
7. Zeng L., Sun H., Peng T., Hui T. Effect of glass content on sintering kinetics, microstructure and mechanical properties of glass-ceramics from coal fly ash and waste glass // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. Т. 260: С. 124120. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124120>
8. Пак А.Я., Губин В.Е., Мамонтов Г.Я. Получение керамики на основе карбида кремния из золошлаковых отходов // *Письма в Журнал технической физики*. 2020. Т. 46, №. 14. С. 21–24. doi.org/10.21883/PJTF.2020.14.49661.18302
9. Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Т.312: С. 114926. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>
10. Czuma N., Zarębska K., Motak M., Gálvez M.E., Patrick Da Costa. Ni/zeolite X derived from fly ash as catalysts for CO₂ methanation // *Fuel*. 2020. Т. 267. С. 117139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117139>
11. Ochedi F.O., Liu Y., Hussain A. A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal // *Journal of cleaner production*. 2020. Т. 267: С. 122143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
12. Estevam S.T., de Aquino, T.F., da Silva, T.D. et al. Synthesis of K-Merlinoite zeolite from coal fly ash for fertilizer application. *Braz. J. Chem. Eng.* 39, 631–643 2022. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00172-9>
13. Усова, Е. Л., Решетова, А. А., Полещук, И. Н., Пимнева, Л. А. Исследование адсорбции ионов меди, никеля и цинка на цеолитсодержащем сорбенте, синтезированном из отходов ТЭС // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 6. С. 1034–1041. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11864>
14. Кутихина, Е. А., Верещагина, Т. А., Мазурова, Е. В., Буйко, О. В., Фоменко, Е. В., & Аншиц, А. Г. Синтез цеолитных материалов на основе дисперсных микросфер из летучих зол от сжигания угля и их сорбционные свойства в отношении Pb (II) и Cd (II) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 837–847. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11718>
15. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы-уноса // *Записки горного института*. 2016. Т. 220: С. 526–531. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.526>
16. Moudar J., El Fami N., Diouri A., Taibi M. Identification and characterization of faujasite zeolite phase in alkali activated class F fly ash // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Т. 58: С. 1447–1451. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.475>
17. Liu C., Zheng Sh., Ma Sh., Luo Y., Ding J., Wang X., Zhang Y. A novel process to enrich alumina and prepare silica nanoparticles from high-alumina fly ash // *Fuel Processing Technology*. 2018. Т. 173: С. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.01.007>
18. Kelly R.P. Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash. In *Proceedings of the World of Coal Ash (WOCA) Conference, Nashville, TN, USA, 5–7 May 2015*.

19. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 246: C. 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>
20. Bekkeri G.B., Shetty K.K., Nayak G. Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. T. 8. №. 10: C. 258. doi.org/10.1007/s41062-023-01227-1
21. Uthaichotirat P., Sukontasukkul P., Jitsangiam P., Suksiripattanapong Ch., Sata V., Chindaprasirt P. Thermal and sound properties of concrete mixed with high porous aggregates from manufacturing waste impregnated with phase change material // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 29. C. 101111. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101111>
22. Pasupathy K., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264: C. 120713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713>
23. Schumacher K., Saßmannshausen N., Pritzel Ch., Trettin R. Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264.:C. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
24. Kangning L., ChunYuan J., Tianyi Y., Dingqi-ang F., Juntao K., Yu Rui. Enhancement of impact resistance for low water/binder cementitious composites (LWBCC) based on porous aggregate: from the perspective of macroscopic and microscopic // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 376: C. 130952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130952>
25. Sahoo S., Selvaraju A. K. Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres // *Cement and Concrete Composites*. 2020. T. 113: C. 103712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103712>
26. Gollakota A. R. K., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. T. 672: C. 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
27. Ma B., Su Ch., Ren X., Gao Z., Qian F., Yang W., Liu G., Li H., Yu J., Zhu Q. Preparation and properties of porous mullite ceramics with high-closed porosity and high strength from fly ash via reaction synthesis process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. (803): C. 981–991. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.272>
28. Shao P., Hou H., Wenlon Wang, Wenfeng Wang. Geochemistry and mineralogy of fly ash from the high-alumina coal, Datong Coalfield, Shanxi, China // *Ore Geology Reviews*. 2023. T. 158: C. 105476. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105476>
29. Fidanchevski E., Angjusheva B., Jovanov V., Murtanovski P., Vladiceska L., Aluloska N.S., Nikolic J., Ipavec A., Šter K., Mrak M., Dolenc S. Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 330: C. 685–694. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07980-w>
30. Zhuginisov Ж., Rakhmetulla A., Oraltayeva, A. Analytical review of research on the technology of light aggregates based on natural and man-made raw materials. *Engineering Journal of Satbayev University*. 2021. T. 143(6), 123–128. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.16>
31. Romero, M.; Padilla, I.; García Calvo, J.L.; Carballosa, P.; Pedrosa, F.; López-Delgado, A. Development of Lightweight Mortars Using Sustainable Low-Density Glass Aggregates from Secondary Raw Materials. // *Materials*. 2023. T.16, №. 18: p. 6281. <https://doi.org/10.3390/ma16186281>

REFERENCES

1. Baran P., Sobala J., Szczurowski J., Zarębska K. Management of Fly Ash to Synthesise Geopolymers and Zeolites. *Energies*. 2023. № 23 (16). C. 7888. <https://doi.org/10.3390/en16237888>
2. Dash S., Panda L., Mohanty I., Gupta P. Comparative feasibility analysis of fly ash bricks, clay bricks and fly ash incorporated clay bricks 2022. <https://doi.org/10.34910/MCE.115.2>
3. Nayak D. K., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*. 2022. (6). C. 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
4. Tian Y. Bourtsalas A., Kawashima Sh., Themelis N.J. Using Waste-to-Energy Fine-Combined Ash as Sand or Cement Substitute in Cement Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023. № 11 (35). C. 04023378. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15684>
5. Tian Yixi Characterization, Stabilization, and Utilization of Waste-to-Energy Residues in Civil Engineering Applications. 2022
6. Vakalova T.V., Revva I. B. Highly porous building ceramics based on «clay-ash microspheres» and «zeolite-ash microspheres» mixtures. *Construction and Building Materials*. 2022. (317). C. 125922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125922>
7. Zeng L., Sun H., Peng T., Hui T. Effect of glass content on sintering kinetics, microstructure and mechanical properties of glass-ceramics from coal fly ash and waste glass. *Materials Chemistry and Physics*. 2021. (260). C. 124120. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124120>
8. Pak A.Y., Gubin V. E., Mamontov G. Ya. Poluchenie keramiki na osnove karbida kremniya iz zoloshlakovykh otkhodov // *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020. No. 14 (46). S. 21. [Production of Silicon Carbide-Based Ceramics from Ash and Slag Waste]. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2020. No. 14 (46). P. 21. (In Russ.) doi.org/10.21883/PJTF.2020.14.49661.18302

9. Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. T.312: C. 114926. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>
10. Czuma N., Zarębska K., Motak M., Gálvez M.E., Patrick Da Costa. Ni/zeolite X derived from fly ash as catalysts for CO₂ methanation // *Fuel*. 2020. T. 267. C. 117139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117139>
11. Ochedi F.O., Liu Y., Hussain A. A review on coal fly ash-based adsorbents for mercury and arsenic removal. *Journal of Cleaner Production*. 2020. (267). C. 122143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122143>
12. Estevam S.T. [and others]. Synthesis of K-Merlinoite zeolite from coal fly ash for fertilizer application. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2022. № 3 (39). C. 631–643. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00172-9>
13. Usova E.L., Reshetova A.A., Poleshchukl.N., Pimneva L.A. Study of thead sorption-of copper, nickel and zinc ionsonzeolite-containing sorbent synthesized from thermal power plant waste. *Sorbtsionnyei khromatograficheskie protsessy*. 2023.23(6):1034-1041. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11864>.
14. Kutikhina E.A., Vereshchagina T.A., Mazurova E.V., Buyko O.V., Fomenko E.V., Anshits A.G. Syn-thesis of zeolite materials based on dispersed microspheres from fly ash from coal combustion and their sorption prop-erties in relation to Pb(II) and Cd(II). *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(5): 837-847. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11718>
15. Kotova O.B., Shabalin I.L., Kotova E.L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 220: p. 526. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.526>
16. Moudar J., El Fami N., Diouri A., Taibi M. Identification and characterization of faujasite zeolite phase in alkali activated class F fly ash // *Materials Today: Proceedings*. 2022. T. 58: C. 1447-1451. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.475>
17. Liu C., Zheng Sh., Ma Sh., Luo Y., Ding J., Wang X., Zhang Y. A novel process to enrich alumina and prepare silica nanoparticles from high-alumina fly ash // *Fuel Processing Technology*. 2018. T. 173: C. 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.01.007>
18. Kelly R.P. Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash. *In Proceedings of the World of Coal Ash (WOCA) Conference, Nashville, TN, USA, 5–7 May 2015*. (In Russ.)
19. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 246: C. 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>
20. Bekkeri G.B., Shetty K.K., Nayak G. Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. T. 8. №. 10: C. 258. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01227-1>
21. Uthaichotirat P., Sukontasukkul P., Jitsangiam P., Suksiripattanapong Ch., Sata V., Chindaprasirt P. Thermal and sound properties of concrete mixed with high porous aggregates from manufacturing waste impregnated with phase change material // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 29. C. 101111. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101111>
22. Pasupathy K., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264: C. 120713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713>
23. Schumacher K., Saßmannshausen N., Pritzel Ch., Trettin R. Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 264.:C. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
24. Kangning L., ChunYuan J., Tianyi Y., Dingqiang F., Juntao K., Yu Rui. Enhancement of impact resistance for low water/binder cementitious composites (LWBCC) based on porous aggregate: from the perspective of macroscopic and microscopic // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 376: C. 130952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130952>
25. Sahoo S., Selvaraju A. K. Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres // *Cement and Concrete Composites*. 2020. T. 113: C. 103712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103712>
26. Gollakota A. R. K., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review // *Science of the Total Environment*. 2019. T. 672: C. 951-989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
27. Ma B., Su Ch., Ren X., Gao Z., Qian F., Yang W., Liu G., Li H., Yu J., Zhu Q. Preparation and properties of porous mullite ceramics with high-closed porosity and high strength from fly ash via reaction synthesis process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. (803): C. 981–991. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.272>
28. Shao P., Hou H., Wenlon Wang, Wenfeng Wang. Geochemistry and mineralogy of fly ash from the high-alumina coal, Datong Coalfield, Shanxi, China // *Ore Geology Reviews*. 2023. T. 158: C. 105476. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105476>
29. Fidanchevski E., Angjusheva B., Jovanov V., Murtanovski P., Vladiceska L., Aluloska N.S., Nikolic J., Ipavec A., Šter K., Mrak M., Dolenc S. Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 330: C. 685-694. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07980-w>
30. Zhuginisov Ж., Rakhmetulla A., Oraltayeva, A. Analytical review of research on the technology of light aggregates based on natural and man-made raw materials. *Engineering Journal of Satbayev Universi-*

ty. 2021. T. 143(6), 123–128. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.16>

31. Romero, M.; Padilla, I.; García Calvo, J.L.; Carballosa, P.; Pedrosa, F.; López-Delgado, A. Development of Lightweight Mortars Using Sustainable Low-Density Glass Aggregates from Secondary Raw Materials. // *Materials*. 2023. T.16, №. 18: p. 6281. <https://doi.org/10.3390/ma16186281>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Решетова А.А. Постановка цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, подготовка и редактирование статьи.

Медведева Э.Н. Анализ результатов исследования, редактирование и оформление статьи.

Усова Е.Л. Проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов.

Плесовских М.С. Проведение экспериментальных исследований.

Королева О.И. Проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Reshetova A.A. Setting the research goals and objectives, analyzing the research results, writing the manuscript.

Medvedeva E.N. Analyzing the research results, writing the manuscript.

Usova E.L. Conducting experimental research, processing experimental results.

Plesovskikh M.S. Conducting experimental research.

Koroleva O.I. Conducting experimental research, processing experimental results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решетова Антонина Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4251-4814>,

SPIN-код: 4188-4759,

Author ID: 739923,

e-mail: reshetovaaa@tyuiu.ru

Медведева Эльза Назифовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4912-738X>,

SPIN-код: 2494-4660,

Author ID: 767501,

e-mail: medvedevaen1@tyuiu.ru

Усова Елена Леонидовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюмен-

ского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>,

SPIN-код: 5672-4122,

Author ID: 759128,

e-mail: usovael@tyuiu.ru

Плесовских Максим Станиславович – магистрант Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

e-mail: PlesovskikhMS@rusgeology.ru

Королева Ольга Игоревна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>,

SPIN-код: 6743-4430,

Author ID: 791875,

e-mail: koroljovaoi@tyuiu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reshetova Antonina A. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4251-4814>,

SPIN-code: 4188-4759,

Author ID: 739923,

e-mail: reshetovaaa@tyuiu.ru

Medvedeva Elza N. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4912-738X>,

SPIN-code: 2494-4660,

Author ID: 767501,

e-mail: medvedevaen1@tyuiu.ru

Usova Elena L. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>,

SPIN-code: 5672-4122,

Author ID: 759128,

e-mail: usovael@tyuiu.ru

Plesovskikh Maksim S. – Post-graduate student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625001).

e-mail: PlesovskikhMS@rusgeology.ru

Koroleva Olga I. – PhD, Associate Professor, Building Materials Department, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarsogo Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>,

SPIN-code: 6743-4430,

Author ID: 791875,

e-mail: koroljovaoi@tyuiu.ru

Научная статья
УДК 691.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>
EDN: QCLYYM



КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.С. Лесовик, В.А. Дудченко ✉, **А.С. Сальникова, О.В. Казлитина**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
✉ ответственный автор
dudchenko.v.a@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное строительство сталкивается с необходимостью экономии природных ресурсов и сокращения объемов строительных отходов, ежегодно образующихся в количестве десятков миллионов тонн в России и странах СНГ. Особенно актуальной проблема утилизации становится в условиях восстановления территорий, пострадавших от военных действий, таких как ЛНР и ДНР и новые регионы Российской Федерации, где разрушенные здания представляют собой как экологическую угрозу, так и потенциальный источник вторичного сырья. Разработка технологий для производства композиционных вяжущих на основе продуктов рециклинга, таких как бой керамзитобетона, является стратегически важной задачей, позволяющей решать экологические проблемы, снижать затраты на восстановление и ускорять темпы строительства.

Цель написания статьи. Целью исследования является разработка и обоснование применения композиционных вяжущих на основе портландцемента с использованием тонкоизмельченного боя керамзитобетона (КБ) в качестве минеральной добавки. Задачи включают изучение влияния удельной поверхности (400 и 1000 м²/кг) и массовой доли добавки (5, 15, 25%) на физико-механические свойства вяжущих, такие как нормальная плотность, плотность и прочность цементного камня, для определения оптимального состава.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовались: портландцемент ЦЕМ I 42,5 (Новоросцемент), кварцевый песок и бой керамзитобетона (КБ). Получение композиционных вяжущих осуществлялось путем совместного помола цемента с предварительно дробленным (фракция 0,14–1,25 мм) КБ до удельной поверхности 400 и 1000 м²/кг. Исследования проводились в соответствии со стандартными методами испытаний в лабораториях Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Определялись нормальная плотность, плотность и прочность на сжатие (в возрасте 7, 14 и 28 сут) образцов-кубов размером 3×3×3 см. При подборе составов руководствовались «законом структурного родства», предполагающим, что совместимость компонентов по составу и структуре обеспечивает лучшие эксплуатационные свойства.

Обсуждение и заключение. Экспериментальные исследования подтвердили, что введение боя керамзитобетона в состав вяжущего позволяет снизить нормальную плотность (водопотребность) и повысить прочность цементного камня при оптимальных параметрах. Наилучшие результаты показал состав с 15% добавки КБ, измельченного до удельной поверхности 1000 м²/кг (состав 5), который достиг максимальной прочности на сжатие – 76,34 МПа на 28 сут, что превышает прочность контрольного образца (70,94 МПа). Это связано с высокой реакционной способностью тонкоизмельченных частиц, способствующих формированию более плотной и однородной структуры. Использование грубодисперсной фракции (400 м²/кг) или превышение дозировки до 25% приводит к снижению прочностных характеристик. Таким образом, оптимальным является введение 15% тонкоизмельченного (S_{уд}=1000 м²/кг) боя керамзитобетона, что позволяет эффективно замещать цемент без потери качества и улучшать эксплуатационные свойства вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бой керамзитобетона, композиционное вяжущее, удельная поверхность, минеральная добавка, прочность, вторичные ресурсы

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С. Лесовик – член редакционной коллегии журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

© Лесовик В.С., Дудченко В.А., Сальникова А.С., Казлитина О.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 02.10.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Все 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., Дудченко В.А., Сальникова А.С., Казлитина О.В. Композиционные вяжущие с использованием продуктов рециклинга строительных материалов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

EDN: QCLYYM

COMPOSITE BINDERS WITH PRODUCTS OF BUILDING MATERIALS RECYCLING

Valery.S. Lesovik, Valeria A. Dudchenko ✉, Alyona S. Salnikova, Olga V. Kazlitina
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia

✉ corresponding author
dudchenko.v.a@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern construction deals with the need to conserve natural resources and reduce construction wastes produced in huge amounts annually, up to millions tons in Russia and in the CIS countries. The problem of recycling becomes especially urgent in the context of the restoration of territories affected by military operations, such as the LPR and the DPR, where destroyed buildings pose both an environmental threat and provide a potential source of secondary raw materials. The development of technologies for the production of composite binders based on recycling products, such as expanded clay, is a strategically important task that allows solving environmental problems, reducing restoration costs and construction speed by localizing resources.

The purpose of the study is to develop and provide rationale for the use of composite binders based on Portland cement and finely ground expanded clay concrete (CB) as a mineral additive. The tasks include studying the effect of the specific surface area (400 and 1000 m²/kg) and the mass fraction of the additive (5%, 15%, and 25%) on the physical and mechanical properties of binders, such as normal density, density and strength of cement stone, to determine the optimal composition.

Materials and methods. The following recycled materials were used: Portland cement CEM I 42,5 (New cement), quartz sand and expanded clay concrete (CB). Composite binders were obtained by co-grinding cement and pre-crushed (fraction 0.14-1.25 mm) cement to obtain a specific surface area of 400 and 1000 m²/kg. The research was conducted in accordance with standard test methods in the laboratories of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The normal density, density, and compressive strength (at the ages of 7, 14, and 28 days) of 3×3×3 cm cube samples were analyzed. Composition determination was based on the structural affinity law, which assumes that the compatibility of components in composition and structure ensures the best operational properties.

Discussion and Conclusion. Experimental studies have confirmed that the introduction of expanded clay concrete into the binder makes it possible to reduce the normal density (water consumption) and increase the strength of cement stone at optimal parameters. The best results were shown by the composition with 15% CB additive, crushed to a specific surface area of 1000 m²/kg (Composition 5), which reached a maximum compressive strength of 76.34 MPa on day 28, which exceeds the strength of the control sample (70.94 MPa). This is due to high reactivity of fine particles, which contribute to a more dense and homogeneous structure. The use of a coarse fraction (400 m²/kg) or exceeding the dosage by up to 25% leads to a decrease in strength characteristics. Thus, it is optimal to introduce 15% finely ground (Sk = 1000 m²/kg) expanded clay concrete, which makes it possible to effectively replace cement without loss of quality and improve the performance properties of the binder.

© Lesovik Valery.S., Dudchenko Valeria A., Salnikova Alyona S., Kazlitina Olga V., 2026



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

KEYWORDS: *broken expanded clay concrete, composite binder, specific surface area, mineral additive, strength, recycled materials*

CONFLICT OF INTEREST: *the authors declare no conflict of interest. V.S. Lesovik is a member of the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal requires reviewing all the manuscripts, regardless of their authors status.*

ACKNOWLEDGEMENT: *This research was supported by a grant from The Russian Science Foundation (project No 25-19-00866). The authors gratefully acknowledge providing research facilities by the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.*

The article was submitted: October 02, 2025; approved after reviewing: November 05, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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., Dudchenko V.A., Salnikova A. S., Kazlitina O.V. Composite binders with products of building materials recycling. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2026; 23 (1): 102-113. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-102-113>

ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная отрасль стоит перед лицом глобальных вызовов, среди которых ключевыми являются необходимость снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и переход к принципам устойчивого развития. Одним из наиболее ресурсоемких и экологически проблемных секторов является производство традиционных вяжущих материалов, в первую очередь портландцемента. На его долю приходится до 8–10% общемировых выбросов углекислого газа (CO₂), что связано с высокоэнергозатратным процессом обжига сырьевой смеси и неизбежными химическими реакциями декарбонизации. В условиях ужесточения экологического законодательства и роста стоимости энергоносителей поиск альтернативных, «зеленых» технологий становится не просто актуальным, а стратегически необходимым [1, 2, 3].

Параллельно с этой проблемой существует другая, не менее значимая, – накопление огромного объема строительных и демонтажных отходов. Ежегодно в мире образуются миллиарды тонн таких отходов, значительную часть которых составляют отсеивы дробления бетонного и керамзитобетонного лома. Традиционно они направляются на полигоны для захоронения, что приводит к отчуждению земель, загрязнению почв и грунтовых вод. Однако эти материалы, уже прошедшие первичный цикл использования, обладают значительным ресурсным потенциалом благодаря своему минералогическому составу.

Перспективным направлением представляется разработка и внедрение композиционных вяжущих с использованием продуктов

рециклинга строительных материалов. Суть данного подхода заключается в частичной замене клинкерной составляющей портландцемента (до 30–50% и более) тонкомолотыми минеральными добавками, полученными из отходов дробления, в частности керамзитобетона. Такие добавки являются не только эффективным разбавителем, снижающим расход клинкера и, как следствие, углеродный след вяжущего, но и активным компонентом, влияющим на формирование структуры и свойства конечного продукта [4, 5, 6].

Актуальность настоящего исследования обусловлена комплексом факторов:

– Экологическим: сокращение выбросов CO₂ и потребления природных ресурсов (известняка, мела и глины) за счет снижения объемов производства клинкера.

– Экономическим: утилизация строительных отходов позволяет снизить затраты на их захоронение и получить дешевый компонент для вяжущего, что уменьшает себестоимость продукции.

– Техническим: получение вяжущих с новыми или улучшенными свойствами (пониженное тепловыделение, повышенная сульфатостойкость, долговечность).

Особую остроту проблема обращения со строительными отходами приобретает в контексте реализации крупномасштабных государственных проектов, таких как программа реновации жилищного фонда, инициированная в 2017 г. и активно реализуемая в Москве, а также рассматриваемая к внедрению в других регионах России. В рамках этой программы планируется снос более 5 000 пятиэтажных зданий и строительство современного жилья для порядка одного миллиона человек.

При этом только в Москве ежегодно образуются миллионы тонн строительного лома – в основном железобетонных конструкций. Эффективная переработка и повторное использование этого потенциального вторичного сырья становятся критически важными как с экологической, так и с экономической точки зрения. Вовлечение отходов реновации в производство новых строительных материалов, в том числе в составе альтернативных вяжущих, может не только снизить нагрузку на полигоны, но и уменьшить зависимость от первичных природных ресурсов, сократить транспортные издержки и внести вклад в достижение целей «зелёной» экономики [7, 8, 9].

Стоит отметить, что в середине XX в. большинство построек исчерпали свой ресурс, что приводит к массовому демонтажу зданий и образованию огромного количества отходов, таких как керамзитобетонный бой и бетонный лом. Ежегодное образование бетонного лома в одной только России и странах СНГ достигает десятков миллионов тонн. К тому же на фоне разрушений, вызванных военными действиями на территориях Луганской и Донецкой Народных Республик, проблема утилизации строительного мусора приобретает критическое значение. Разрушенные здания, значительная часть которых построена из керамзитобетона, представляют собой не только экологическую угрозу, но и потенциальный источник вторичного сырья для восстановления [10, 11, 12].

Особый интерес представляет использование именно отсевов дробления керамзитобетона. В отличие от отходов тяжелого бетона, в состав которых входит плотный щебень, керамзитобетон содержит в своем составе легкий пористый заполнитель – керамзит. Продукты его дробления, помимо частиц цементного камня, включают в себя многочисленные обломки керамзитовых гранул. Эти обломки, будучи измельченными до микронных размеров, проявляют выраженную пуццолановую и микронаполнительную активность. Высокодисперсные частицы керамзита, богатые аморфными оксидами кремния и алюминия (SiO_2 и Al_2O_3), способны вступать в реакцию с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образующимся при гидратации цемента, формируя дополнительные количества прочных гидросиликатов кальция [13, 14]. Это приводит к уплотнению цементного камня, улучшению его микроструктуры и повышению прочностных характеристик композита.

Закон подобия представляет собой фундаментальный принцип, регулирующий взаи-

модействие компонентов в полиминеральных твердеющих системах. Его реализация предполагает соблюдение трёх ключевых условий:

- использование нескольких тонкодисперсных полиминеральных веществ, включающих как аморфные, так и кристаллические фазы;

- наличие подобия свойств, понимаемое как соизмеримость физико-механических (коэффициент температурного изменения объёма, деформативные характеристики), физико-химических (электродный потенциал, знак заряда поверхности) и энергетических (свободная энергия, энергия атомизации, энергоплотность) параметров компонентов;

- высокие адгезионные свойства взаимодействующих фаз.

Ключевым следствием подобия свойств компонентов является близость их физико-механических и химических характеристик, что позволяет получить сопоставимые коэффициенты теплового расширения и деформативных показателей. Это, в свою очередь, обеспечивает термомеханическую совместимость фаз в процессе эксплуатации, что является определяющим фактором для достижения высокой прочности и долговечности композита. Данный вывод подтверждается наблюдаемыми прочностными и долговечностными характеристиками природных аналогов строительных материалов, которые также демонстрируют высокую стабильность за счет естественной гармонии свойств составляющих компонентов.

Напротив, нарушение принципа подобия, в частности, применение компонентов с существенно различающимися по величине физико-механическими и энергетическими характеристиками, приводит к замедлению кинетики гидратационных процессов, снижению степени кристалличности системы и ухудшению эксплуатационных свойств конечного материала.

Таким образом, закон подобия служит методологической основой для целенаправленного подбора природного и техногенного сырья при проектировании строительных композитов с заданными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [15, 16, 17, 18].

Кристаллографическая и гранулометрическая структура: подобие форм и размеров частиц способствует плотной упаковке и формированию однородной структуры.

Коэффициент термического расширения (КТР): различие в КТР не должно превышать 8%, иначе при температурных колебаниях воз-

никают внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию и разрушению.

Фазовый состав и поведение воды, сродство по фазовым переходам воды в порах критически важной для морозостойкости и долговечности. Этот закон предполагает, что композит – это не просто смесь, а сложная самоорганизующаяся система, где каждый элемент выполняет свою функцию, а любое изменение одного компонента влияет на свойства всей системы [19, 20].

Продукты рециклинга (дробленый бетон, кирпичный бой, бой керамзитобетона и т.д.) обладают огромным потенциалом как минеральные наполнители и заполнители. Однако их успешное внедрение требует строгого соблюдения принципов сродства структур.

Раздельный помол определенной фракции заполнителя (например, отсевом кварцито-песчаника) позволяет создать композиционное вяжущее с заданной удельной поверхностью. Это способствует самоорганизации системы и формированию гомогенной нано- и микро-структуры, что повышает прочность и снижает водопроницаемость вяжущего.

Таким образом, разработка композиционных вяжущих на основе продуктов переработки керамзитобетонных отходов представляет собой яркий пример реализации экономики замкнутого цикла (circular economy) в строительстве. Данная работа направлена на исследование влияния тонкомолотых отсеков дробления керамзитобетона на физико-механические свойства композиционных вяжущих и оценку потенциала их применения для получения эффективных и экологически безопасных строительных материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных компонентов для разработки композиционных вяжущих использованы портландцемент ЦЕМ I 42,5 ПЦ-500 Д-0 (Новоросцемент Верхнебаканский ВБЦЗ, г. Новороссийск) Для получения композиционного вяжущего осуществлялось дробление керамзитобетона в лабораторной щёковой дробилке ЩД10, далее был осуществлен отбор фракций 0–1,25 мм, которые измельчались до $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ в роторно-шаровой мельнице. И после вводили в портландцемент в различном количестве. В полученную смесь добавили воду до достижения нормальной густоты, определяемой с помощью прибора Вика, тщательно перемешивали и помещали в формы 30×30×30 мм. Затем их составы расформовывали и хранили в воде до дости-

жения требуемого возраста испытаний – 7, 14 и 28 сут. Испытания на прочность при сжатии проводили на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Нагружение осуществляли с постоянной скоростью, соответствующей требованиям ГОСТ 310.4–81.

Для оценки влияния дозировки добавки были исследованы три варианта замещения цемента:

5% – минимальное содержание, направленное на изучение порогового эффекта;

15% – среднее содержание, потенциально оптимальное по балансу свойств;

25% – максимальное содержание, при котором ещё возможно сохранение приемлемых характеристик вяжущего.

Контрольный образец (без добавки КБ) использовался для сравнительной оценки.

Такой подход обеспечивает эффективное взаимодействие компонентов, повышение реакционной способности добавок и формирование высококачественной цементной матрицы.

Исследования включали определение физико-механических свойств вяжущих, таких как нормальная густота и прочность цементного камня.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже упоминалось выше, применение переработки керамзитобетона (КБ) и утилизация его в виде минеральной добавки входящей в состав композиционного вяжущего с заменой соответствующей части цемента имеет большой потенциал. Настоящими исследованиями была определена эффективность введения КБ в вяжущее, которая напрямую зависит от удельной поверхности частиц КБ и массовой доли в составе смеси.

Оптимальное содержание рециклинга керамзитобетона обеспечивает улучшение технологических и эксплуатационных свойств материала. Однако превышение допустимой концентрации может привести к ухудшению механических показателей и увеличению водопоглощения. Таким образом, подбор рационального сочетания дисперсности и количества добавки является ключевым фактором при производстве композиционном вяжущем с использованием КБ.

Удельная поверхность ($S_{уд}$) – это суммарная площадь поверхности всех частиц добавки на единицу массы ($\text{м}^2/\text{кг}$). Чем выше этот показатель, тем больше реакционная способность материала, поскольку увеличивается контактная зона между частицами добавки и цементным камнем. Поэтому в исследовании использовали достаточно разные значения удельных

поверхностей минеральных добавок: $S_{уд} = 1000$ м²/кг – тонкоизмельчённая фракция, обладающая высокой реакционной активностью, и $S_{уд} = 400$ м²/кг – грубодисперсная фракция, характеризующаяся меньшей активностью, но способная выполнять функцию микронаполнителя и регулятора реологических свойств.

Экспериментальным путем при помощи прибора Вика была определена нормальная густота вяжущих с различной дозировкой минеральных добавок, полученных из КБ: при 25% $S_{уд} = 1000$ м²/кг – НГ=27,68% и $S_{уд} = 400$ м²/кг – НГ=27,57%; при 15% $S_{уд} = 1000$ м²/кг – НГ=27,5% и $S_{уд} = 400$ м²/кг – НГ=27,62%; при 5% $S_{уд} = 1000$ м²/кг – НГ=27,43% и $S_{уд} = 400$ м²/кг – НГ=27,37%; и контрольный без добавки – НГ =28,0%.

Анализ полученных данных показывает, что введение переработанного керамзитобетона (КБ) в состав вяжущего снижает нормальную густоту по сравнению с контрольным образцом (28,0%), что свидетельствует об уменьшении водопотребности системы и, как следствие, потенциальном улучшении плотности и прочности цементного камня за счёт снижения водоцементного отношения.

Наименьшее значение НГ (27,37%) зафиксировано при дозировке 5% и удельной поверхности 400 м²/кг – это может быть связано с эффектом микронаполнения грубодисперсной фракции, которая частично замещает цемент, не требуя дополнительной воды для смачивания, в отличие от более активной, но более водопотребной тонкоизмельчённой фракции ($S_{уд} = 1000$ м²/кг).

Однако с увеличением дозировки добавки наблюдается тенденция к росту НГ, особенно при использовании высокодисперсной фракции:

при 5% → 27,43% ($S_{уд} = 1000$);

при 15% → 27,50%;

при 25% → 27,68%.

Это объясняется тем, что частицы с высокой удельной поверхностью обладают большей адсорбционной способностью и требуют больше воды для достижения стандартной консистенции. В то же время грубодисперсная фракция (400 м²/кг) демонстрирует более стабильное поведение: её влияние на НГ менее выражено, а при 25% даже снижается по сравнению с 15% (27,57% против 27,62%), что может указывать на предельное насыщение системы и эффект «разбавления» цементного теста [20, 21, 22, 23].

Таким образом, оптимальное соотношение дисперсности и дозировки позволяет не только снизить расход цемента, но и управлять реологическими свойствами вяжущего. Хотя минимальная водопотребность достигается при низкой дозировке (5%) и грубой фракции, для обеспечения комплекса требуемых свойств (включая прочность и долговечность) необходимо рассматривать баланс между снижением НГ и реакционной способностью добавки, что подтверждается дальнейшими испытаниями на прочность.

Из полученных составов были заформованы образцы размером 3×3×3 и испытаны на 7, 14 и 28 сут, составы представлены в таблице.

Таблица
Составы полученных композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table
Compositions of the obtained composite binders
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Состав		Удельная поверхность минеральной добавки, м ² /кг	Плотность цементного камня, кг/м ³
	ЦЕМ I 42,5, %	Минеральная добавка КБ, %		
Состав 1	100	-	-	1998
Состав 2	95	5	400	1994
Состав 3	85	15	400	1917
Состав 4	75	25	400	2081
Состав 5	95	5	1000	2055
Состав 6	85	15	1000	2006
Состав 7	75	25	1000	1975

Анализируя данные по плотности цементного камня, можно отметить, что в большинстве случаев плотность составов с минеральной добавкой КБ при удельной поверхности $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ выше, чем при $S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$, что свидетельствует о более плотной структуре материала. Например, максимальное значение плотности ($2055 \text{ кг}/\text{м}^3$) достигнуто при использовании тонкоизмельчённой фракции ($S_{\text{уд}}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$), тогда как при $S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$ плотность не превышает $2006 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Это, вероятно, объясняется повышенной реакционной способностью частиц с высокой удельной поверхностью, которые активнее участвуют в гидратационных процессах и способствуют образованию более плотной и однородной структуры цементного камня за счёт заполнения пор и формирования дополнительных продуктов гидратации [24]. Кроме того, тонкие частицы лучше распределяются в системе, снижая количество крупных пор и

уменьшая водопотребность, что также способствует увеличению плотности.

Напротив, грубодисперсная фракция ($S_{\text{уд}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$) обладает меньшей активностью и может выступать преимущественно в роли инертного наполнителя, что ограничивает её способность уплотнять структуру. В некоторых случаях она даже может способствовать снижению плотности из-за образования микропустот или неполного заполнения пространства между цементными зёрнами [24].

Таким образом, высокая удельная поверхность КБ ($1000 \text{ м}^2/\text{кг}$) положительно влияет на плотность цементного камня, что делает её предпочтительной при создании высококачественных композиционных вяжущих с минимальным содержанием цемента. Однако для окончательной оценки необходимо учитывать совокупность свойств, включая прочность, водопоглощение и долговечность.

Результаты испытаний показаны на рисунке.

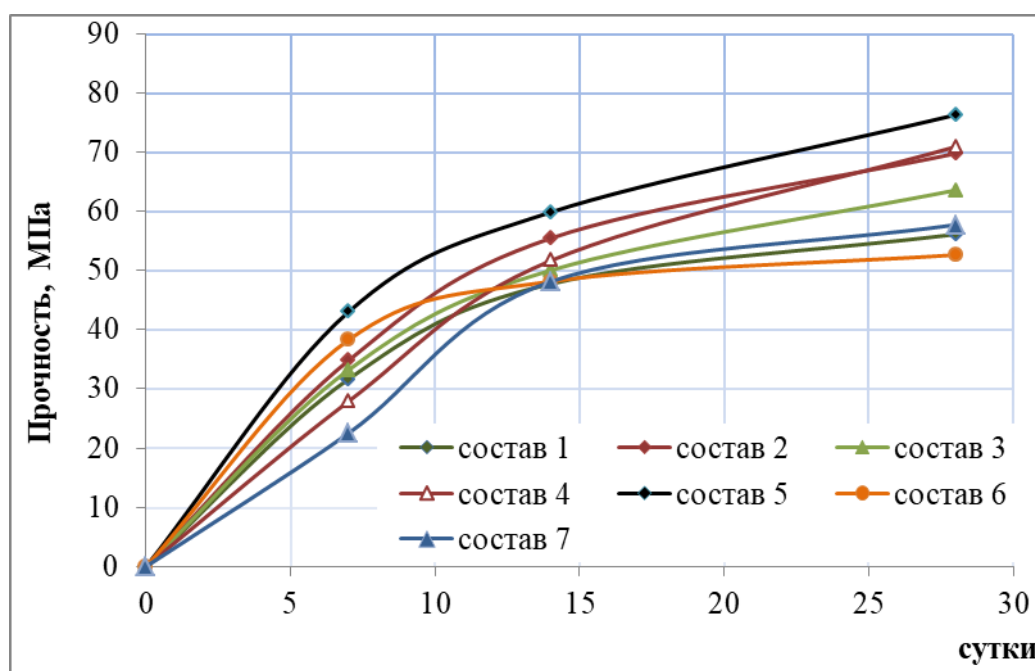


Рисунок – Прочность цементного камня
Источник: составлено авторами.

Figure – Cement stone strength
Source: compiled by the authors.

На основе данных о прочности на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 сут (см. таблицу) и визуализации на графике (см. рисунок) можно сделать следующие выводы.

Максимальные прочностные показатели продемонстрировал состав 5 (95% цемента + 5% КБ, удельная поверхность 1000 м²/кг):

- 7 сут – 43,02 МПа;
- 14 сут – 59,89 МПа;
- 28 сут – 76,34 МПа.

Этот результат превышает прочность контрольного состава на 36,0%, что свидетельствует о высокой реакционной активности тонкоизмельчённой добавки. Увеличение удельной поверхности до 1000 м²/кг способствует заполнению порового пространства продуктами гидратации и формированию плотной, однородной структуры цементного камня.

Состав 2 (5% КБ, $S_{уд} = 400$ м²/кг) также показал значительное упрочнение — 69,80 МПа (+24,4% к контролю), однако уступает составу 5, что подтверждает ключевую роль дисперсности в активизации вторичного сырья. При увеличении дозировки КБ до 15 и 25% наблюдается нелинейная зависимость прочности от содержания добавки. Так, состав 6 (15% КБ, $S_{уд} = 1000$ м²/кг) демонстрирует снижение прочности до 52,67 МПа (–6,2% относительно контроля), что указывает на разбавление активной цементной фазы и нарушение структурной целостности композита. Аналогично состав 7 (25% КБ, $S_{уд} = 1000$ м²/кг) характеризуется минимальным приростом прочности к 28 сут (57,76 МПа, +2,9%) и резко замедленным твердением на ранних сроках (22,51 МПа на 7 сут, – 28,9% к контролю), что свидетельствует о подавлении начальных стадий гидратации.

Интересную особенность демонстрирует состав 4 (25% КБ, $S_{уд} = 400$ м²/кг), достигающий прочности 70,94 МПа (+26,4% к контролю), однако при этом на 7 сут его прочность (27,89 МПа) ниже контрольной на 11,9%. Вероятно, в данном случае имеет место запаздывающая активация добавки, обусловленная низкой дисперсностью и высокой дозировкой.

Анализ динамики набора прочности подтверждает, что наиболее интенсивное структурообразование происходит в составе 5: прирост прочности с 7 до 14 сут составляет 16,87 МПа (+39,2%), что значительно превышает темпы твердения как контрольного, так и остальных модифицированных составов.

Таким образом, оптимальным вариантом модификации цементного вяжущего является

введение 5% переработанного керамзитобетона с удельной поверхностью 1000 м²/кг. Данное содержание обеспечивает максимальную прочность, ускоренный темп твердения и эффективное замещение цемента без ухудшения эксплуатационных свойств. Установлено, что дальнейшее увеличение содержания добавки, даже при высокой степени измельчения, приводит к снижению прочностных характеристик, что обусловлено нарушением баланса между активной вяжущей фазой и инертным компонентом. Следовательно, для рационального использования вторичного сырья в составе высокопрочных композиционных вяжущих необходимо строго контролировать как дозировку, так и степень диспергирования минеральной добавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс проведённых экспериментальных исследований подтвердил эффективность применения тонкоизмельчённого боя керамзитобетона в качестве минеральной добавки в композиционных вяжущих, разработанных с учётом принципов закона структурного сродства. Установлено, что оптимальные физико-механические свойства цементного камня достигаются при введении 5% минеральной добавки из переработанного керамзитобетона с удельной поверхностью 1000 м²/кг (состав 5). В этом случае прочность на сжатие к 28 сут составляет 76,34 МПа, что на 36,0% превышает показатель контрольного состава (56,15 МПа). Такое значительное упрочнение обусловлено высокой реакционной активностью тонкодисперсных частиц, которые интенсивно участвуют в пуццолановых реакциях, способствуют заполнению микропор и формированию плотной, гомогенной структуры цементного камня.

Использование грубодисперсной фракции (удельная поверхность 400 м²/кг) или увеличение дозировки добавки до 15–25%, даже при высокой степени измельчения, приводит к снижению прочностных характеристик. Это свидетельствует о необходимости строгого соблюдения баланса между концентрацией и дисперсностью модифицирующей добавки.

Кроме того, введение КБ сопровождается снижением нормальной густоты теста – до 27,37% по сравнению с 28,00% у контрольного состава, что указывает на уменьшение водопотребности системы. Снижение водоцементного отношения при сохранении удобоукладываемости способствует повышению плотности, снижению пористости и, как следствие, улучшению долговечности цементного

камня. Таким образом, разработанная технология позволяет не только эффективно утилизировать строительные отходы, но и создавать высококачественные вяжущие с улучшенными эксплуатационными свойствами. Это особенно актуально для регионов, подвергшихся разрушениям, таких как ЛНР, ДНР и новые регионы Российской Федерации, где локальная переработка боя керамзитобетона в мини-производствах может стать основой для экономически выгодного и экологически безопасного восстановления инфраструктуры. Внедрение таких решений способствует снижению зависимости от поставок цемента, сокращению объёмов свалок и ускорению темпов строительства за счёт использования доступного местного сырья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Володченко А.А., Лесовик В.С. Состояние и перспективы использования техногенного сырья // Региональное сотрудничество БРИКС: вопросы рационального природопользования – экология, просвещение, туризм: материалы Международной научно-практической конференции: тезисы докладов, Петрозаводск, 14–15 сентября 2023 года. Петрозаводск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2023. С. 15–16.
2. Ищенко А.В., Твердохлебова Е.А. Обзор современных технологий утилизации отходов строительного производства // Инженерный вестник Дона. 2024. № 3(111). С. 1–13.
3. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. № 11.
4. Баруздин А.А., Закревская Л.В., Николаева К.А. Композиционный материал на основе техногенных отходов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21).
5. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Фомина Е.В. Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3, № 2(9). С. 7–17. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2\(9\)-7-17](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17)
6. Ельчищева Т.Ф., Ерофеева И.В. Композиционное вяжущее для изготовления бетонов и растворов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII Международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. С. 348–349.
7. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // Hydration kinetics and rheological behavior // Construction and Building Materials. 2018. Т. 184. С. 304–310.
8. Аласханов А.Х. Полифункциональные строительные композиты на основе техногенного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Грозный, 2023. 478 с.
9. Arbi Alaskhanov, Valery Lesovik, Alexander Tolstoy; “Green” composites based on technogenic raw materials. AIP Conf. Proc. 24 May 2023; 2758 (1): 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0145717>
10. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). Compos. Part B Eng. 2021; 224: 109220.
11. Cigala R.M., Papanikolaou G., Lanzafame P., Sabatino G., Tripodo A., La Ganga G., Crea F., Ielo I., De Luca G. Transforming Waste into Sustainable Construction Materials: Resistant Geopolymers from Recycled Sources. Recycling 2025. 10, 118. <https://doi.org/10.3390/recycling10030118>
12. Аль-Мансури Н., Хади М.Н.С., Аравинтан Т. Механические свойства лёгкого бетона, армированного полипропиленовым волокном Barchip, на основе вторичного дроблёного лёгкого керамзитового заполнителя // Frontiers in Materials. 2021. Т. 8. Ст. 753619. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.753619>
13. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Babaev Z. Dzhumaniyazov Z. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea. Glass and Ceramics. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10717-023-00560-2>
14. Петкогло В.Н., Пунцель И.Я., Кравченко С.А., Постернак А.А. Основы оптимизации подбора состава керамзитобетона для монолитного строительства // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 4-1(60). С. 171–179.
15. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород : Изд-во БГТУ, 2014. 195 с.
16. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аль Мамури С.К.Ш., Гунченко Т.С. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2020. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-vyazhuschie-na-osnove-betonogo-loma> (дата обращения: 25.09.2025)
17. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 120.
18. Аласханов А.Х., Таймасханов Х.Э., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С.А. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 1(27). С. 63–70. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.50.97.008>
19. Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 3. С. 8–16.

<https://doi.org/https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16>

20. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури С.К.Ш. Получение вяжущих композиций оптимальных составов на основе портландцемента и отходов боя керамического кирпича // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 19–30. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30> EDN: QZAHQL

21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Yu., Podgorniy D.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. P. 104–110.

22. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207

23. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17).

24. Tahwia, A.M., Abdellatif, M., Salah, A. et al. Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolymer concrete. *Sci Rep* 15, 11049 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x>

REFERENCES

1. Volodchenko A.A., Lesovik V.S. The state and prospects of using technogenic raw materials // BRICS regional cooperation: issues of rational use of natural resources - ecology, education, tourism : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: abstracts, Petrozavodsk, September 14-15, 2023. Petrozavodsk: Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2023, pp. 15-16.

2. Ishchenko A.V., Tverdokhlebova E.A. Obzor sovremennykh tekhnologiy utilizatsii otkhodov stroitel'nogo proizvodstva [Review of modern technologies for utilization of construction waste]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2024, no. 3(111), pp. 1–13. (in Russ.)

3. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Teoreticheskie osnovy i praktiki realizatsii reinzhiniringa v stroitel'stve [Theoretical foundations and practices of reengineering implementation in construction]. *Vestnik MGSU*, 2024, no. 11.

4. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V., Nikolaeva K.A. Kompozitsionnyy material na osnove tekhnogennykh otkhodov [Composite material based on industrial waste]. *Ekspert: teoriya i praktika*, 2023, no. 2(21). (in Russ.)

5. Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Salnikova A.S., Fomina E.V. Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete // *Industrial processes and technologies*. 2023. Vol. 3. No. 2(9). pp. 7-17. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2\(9\)-7-17](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17)

6. Yelchishcheva T.F., Erofeeva I.V. Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya izgotovleniya betonov i rastvorov [Composite binder for the production of concretes and mortars]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksiy i sooruzheniy: Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma* [Current Problems of Computer Modeling of Structures and Constructions: Abstracts of the VIIIth International Symposium], Tambov, May 17–21, 2023. Tambov: IP Chesnokova A.V., 2023, pp. 348–349. (in Russ.)

7. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // *Hydration kinetics and rheological behavior* // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 184. C. 304–310.

8. Alaskhanov A.Kh. Polifunktsional'nye stroitel'nye kompozity na osnove tekhnogennogo syr'ya: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.23.05 [Multifunctional construction composites based on industrial raw materials: Dr. tech. sci. diss.]. Grozny, FGBOU VO "Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet", 2023. 478 p. (in Russ.)

9. Arbi Alaskhanov, Valery Lesovik, Alexander Tolstoy; "Green" composites based on technogenic raw materials. *AIP Conf. Proc.* 24 May 2023; 2758 (1): 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0145717>

10. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 224, p. 109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>

11. Cigala R.M.; Papanikolaou G.; Lanzafame P.; Sabatino G.; Tripodo A.; La Ganga G.; Crea F.; Ielo I.; De Luca G. Transforming Waste into Sustainable Construction Materials: Resistant Geopolymers from Recycled Sources. *Recycling* 2025. 10, 118. <https://doi.org/10.3390/recycling10030118>

12. Al-Mansuri N., Hadi M.N.S., Aravinthan T. Mekhanicheskie svoystva lyogkogo betona, armirovannogo polipropilenovym voloknom Barchip, na osnove vtorichnogo droblennogo lyogkogo keramzitovogo zapolnitelya [Mechanical properties of lightweight concrete reinforced with Barchip polypropylene fiber based on recycled crushed lightweight expanded clay aggregate]. *Frontiers in Materials*, 2021, vol. 8, art. 753619. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.753619>. (in Russ.)

13. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Babaev Z., Dzhumaniyazov Z. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea. *Glass and Ceramics*. 2023. <https://doi.org/80.10.1007/s10717-023-00560-2>

14. Petkoglo V.N., Puntsel' I.Ya., Kravchenko S.A., Posternak A.A. Osnovnye optimizatsii podbora sostava keramzitobetona dlya monolitnogo stroitel'stva [Key optimizations in selecting the composition of expanded clay concrete for monolithic construction]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*, 2020, no. 4–1(60), pp. 171–179. (in Russ.)

15. Lesovik V.S. Geonika (geomimetika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii [Geonics

(Geomimetics): Examples of Implementation in Construction Materials Science]. Belgorod, BSTU, 2014. 195 p. (in Russ.)

16. Lesovik R.V., Ahmed A.A.A., Al Mamouri S.K.S., Gunchenko T.S. Kompozitsionnye vyazhushchie na osnove betonnoho loma [Composite binders based on concrete scrap]. *Vestnik BSTU imeni V.G. Shukhova*, 2020, no. 7, pp. 8–18. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-vyazhuschie-na-osnove-betonnoho-loma>. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-7-8-18>. (in Russ.)

17. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonika (geonimika) i poisk optimal'nykh resheniy v stroitel'nom materialovedenii [Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in construction materials science]. *Vestnik SibADI*, 2021, vol. 18, no. 1(77), pp. 120–134. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

18. Alaskhanov A., Taimaskhanov H., Saidumov M., Murtazayeva T. Modern approaches to the development of multi-component binders using man-made raw materials. *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*. 2022. 63-70. (in Russ.) <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.50.97.008>

19. Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevsky I.S. Investigation of the macroporous structure of cellular concrete. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 3. pp. 8-16. (in Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16>

20. Makhortov D., Zagorodnyuk L., Sumskey D., Mamouri Saad. Obtaining binder compositions of optimal compositions based on portland cement and ceramic brick waste. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2022; 7. 19-30. (in Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30>

21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Elistratkin M.Yu., Podgorniy D.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021; vol. 147, pp. 104–110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77284-0_10

22. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G. et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Construction and Building Materials*, 2020; vol. 263, p. 120207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120207>

23. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Yu. Vysokoprochnye betony na kompozitsionnykh vyazhushchikh s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [High-strength concretes based on composite binders using industrial raw materials]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2016; no. 2(17), pp. 45–51. (in Russ.)

24. Tahwia A.M., Abdellatif M., Salah A. et al. Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolymer concrete. *Sci Rep* 15, 11049 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, чл-корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,
Scopus Author ID: 55887733300,
Researcher ID: A-4757-2016,
e-mail: naukavs@mail.ru

Дудченко Валерия Александровна – аспирант, ассистент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 8957-1566,
Author ID: 1170036,
e-mail: dudchenko.v.a@mail.ru

Сальникова Алёна Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 1024-6672,
Author ID: 1065785,
e-mail: privet.9292@mail.ru

Казлитина Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

SPIN-код: 6312-7790,
Author ID: 732580,
e-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lesovik Valery S. – Dr. of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Department of Building Materials, Products and Designs at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

Scopus Author ID: 55887733300,

Researcher ID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Dudchenko Valeria A. – Postgraduate student, Assistant Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 8957-1566,

Author ID: 1170036,

e-mail: dudchenko.v.a@mail.ru

Salnikova Alyona S. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials at Belgorod state

technological University. V. G. Shukhov (BSTU named. V. G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 1024-6672,

Author ID: 1065785,

e-mail: privet.9292@mail.ru

Kazlitina Olga V. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials, Products and Designs at Belgorod state technological University. V. G. Shukhov (BSTU named. V. G. Shukhov) (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

SPIN-code: 6312-7790,

Author ID: 732580,

e-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

Научная статья
УДК 625.7.
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-114-129>
EDN: LXFVPU



КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПУТЁМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

М.А. Рюмкин¹, В.А. Шнайдер² ✉

¹ООО «Автодорпроект»,
г. Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
wihor@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной проблемой городов стала необеспеченная пропускная способность существующей городской транспортной сети в связи с ростом интенсивности движения за последние десятилетия и увеличения количества легковых автомобилей в составе транспортного потока. Обнаруженная проблема затрагивает большие города нашей страны и обусловлена увеличением уровня урбанизации. Регулярно возникающие заторы ухудшают качество жизни населения, негативно влияя также на экономическое благополучие и экологическую обстановку городских территорий. Пропускная способность улично-дорожной сети зависит от многих факторов. При решении задач повышения пропускной способности необходимо учитывать тип исследуемого объекта: городская дорога или дорога общего пользования; относится объект исследования к линейному участку; является ли примыканием (в одном и разных уровнях) либо пересечением (в одном и разных уровнях). Одним из инструментов для повышения пропускной способности на сегодняшний день являются интеллектуальные транспортные системы. Для задач мониторинга, контроля совместно с ИТС активно стали применяться технологии машинного зрения. Целью нашего исследования является разработка концепции интеллектуальной транспортной системы для повышения пропускной способности, существующей транспортной сети путем регулирования транспортных потоков с применением машинного зрения.

Материалы и методы. Рассматриваемый участок улично-дорожной сети находится в Центральном районе г. Омска. Исследования проводились в будние дни, в течение часа в утреннее и вечернее время часа пик. Учет проводился путем фиксирования прохождения пешеходов и проезда каждого транспортного средства через сечение. Применение видеофиксации дало возможность более точно определить количество транспортных средств, которые проезжают через рассматриваемое поперечное сечение. Полученные данные стали основой для создания транспортной модели как цифрового двойника, использования данных для обоснования принятых проектных решений, учета транспортных средств и принятых решений об актуализации светофорных циклов. Для оценки пропускной способности использовался программный комплекс PTV Vissim. В микроскопическую модель транспортного потока заложены модель поведения за впереди идущим автомобилем и модель смены полосы движения. Результат имитации – анимация движения транспорта в режиме онлайн на графических поверхностях и автономное перечисление различных транспортно-технических параметров.

Результаты. Концепция предполагает перераспределение транспортных потоков на альтернативный путь движения за счет машинного зрения, искусственного интеллекта и дорожных знаков группы 5.15. В программном комплексе PTV Vissim смоделировано решение с учетом предлагаемой концепции. Путем имитационного моделирования зафиксирован наиболее оптимальный временной интервал работы концепции, который составил ограничение работы модели в 20 мин. Данный промежуток позволяет как «распустить» потоки, так и не допустить заторы в течение часа пик.

Обсуждение и заключение. Развитие интеллектуальной системы, разработка усовершенствованных систем контроля и учета транспортных средств является важнейшим направлением исследований в области повышения пропускной способности транспортных потоков населенных пунктов. Для реализации на практике данной концепции необходима финансовая поддержка (государственное финансирование/гранты/частные инвестиции), привлечение профильных специалистов (комплексная задача) требует более детальную проработку проекта.

© Рюмкин М.А., Шнайдер В.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пропускная способность, улично-дорожная сеть, транспортная сеть, интеллектуальные транспортные системы, машинное зрение, интенсивность движения, картограмма транспортных потоков, концепция, моделирование транспортных потоков, коэффициент загрузки

Статья поступила в редакцию 10.12.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

Все 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: Рюмкин М.А., Шнайдер В.А. Концепция повышения пропускной способности путём регулирования транспортных потоков на основе машинного зрения // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 114-129. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-114-129>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-114-129>

EDN: LXFBPU

CONCEPT OF INCREASING TRAFFIC CAPACITY BY REGULATING TRAFFIC FLOWS BASED ON MACHINE VISION

Maxim A. Ryumkin¹, Victoria A. Schneider² ✉

¹Avtodorproekt LLC,
Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
wihor@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The main problem facing modern cities is the insufficient road capacity within the operating urban transport network due to the increase of traffic intensity observed over the past decades and the growing number of passenger vehicles in traffic flows. The identified problem is relevant for large and major cities across the country and it is caused by the rising level of urbanization. Regular traffic congestion worsens living conditions, negatively affecting both the economic well-being and the ecological situation in urban areas. The traffic capacity of street-and-road network depends on many factors. When addressing the issue of increasing traffic capacity, it is necessary to consider the type of transport facility — whether it is an urban road or a road of general use; if the research object is a straight section, a junction, or an intersection (built at the same or different levels). One of the tools for increasing traffic capacity today is Intelligent Transport Systems (ITS). Along with ITS, machine vision technologies have been widely used for monitoring and control tasks. The purpose of this research is to develop a concept for an intelligent transport system aimed at increasing the traffic capacity of the urban road network through regulation of traffic flows with machine vision technology.

Materials and methods. A section of urban street-and-road network located in the Central District of Omsk has been investigated. One-hour surveys were carried out on weekdays, in the morning and evening peak periods. Data collection involved recording of both pedestrian and vehicle movement for a cross-section. The use of video recording made it possible to determine more accurately the number of vehicles that pass through the cross section. The data obtained formed the basis for building a transport model as a digital twin, taking design solutions, analysis of traffic census and updating traffic light cycles. The PTV Vissim software package was used to evaluate traffic capacity. The microscopic model of traffic flow includes a movement pattern for following a vehicle ahead and a pattern for changing lanes. The results of the simulation include animated traffic movements visualized online, displaying various transport and technical parameters.

Results. The concept suggests redirecting traffic flows to an alternative route with machine vision, artificial intelligence and road signs of 5.15 group. Within the PTV Vissim software, a model of the proposed concept was developed. Simulation results identified the optimal operational time interval for the concept — a 20-minute period. This interval allows redirecting the flows and preventing congestions during rush hours.

Discussion and conclusions. The development of intelligent systems and advanced traffic monitoring and control

© Ryumkin Maxim A., Schneider Victoria A., 2026



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

methods is a vital area of modern urban transport research concerning the increase of traffic capacity. For practical implementation, the proposed concept requires financial support (government funding or grants, private investments), recruiting professional experts and carrying out a more detailed project elaboration.

KEYWORDS: *traffic capacity, street-and-road network, transport network, intelligent transport systems, machine vision, traffic intensity, traffic volume map, concept, traffic flow modeling, road occupancy factor*

The article was submitted: December 10, 2025; approved after reviewing: January 21, 2026; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Rjumkin M.A., Schneider V.A. Concept of increasing traffic capacity by regulating traffic flows based on machine vision. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 114-129. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-114-129>

ВЕДЕНИЕ

В связи с ростом интенсивности движения за последние десятилетия и увеличения количества легковых автомобилей в составе транспортного потока основной проблемой городов стала необеспеченная пропускная способность существующей городской транспортной сети. Выявленная проблема касается всех крупных городов России, которая связана с ростом урбанизации. Постоянно образующиеся пробки снижают уровень комфортабельности жизни, сокращая как экономические, так и экологические показатели городов.

Привлекательность города и комфортность проживания в нем определяются с помощью индекса качества городской среды, который учитывает город по размеру, а также климатические условия его территориального расположения. «Индекс формируется Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Результаты формирования индекса используются в реализации положений Указа Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года», национального проекта «Жилье и городская среда», в том числе для определения размера субсидии из федерального бюджета бюджетам субъектов РФ на поддержку государственных программ субъектов РФ и муниципальных программ формирования современной городской среды»¹.

В расчет индекса качества городской среды входят:

- жилье и прилегающее пространство;
- общественно-деловая инфраструктура и прилегающие пространства;
- улично-дорожная сеть;
- социально-досуговая инфраструктура и прилегающее пространство;
- озелененные пространства;
- общегородское пространство.

Оценка индекса качества городской среды осуществляется на основе следующих критериев: безопасность, идентичность и разнообразие, комфортность, современность и актуальность среды, экологичность и здоровье, эффективность управления.

В соответствии с данными, представленными на сайте, индекс качества городской среды г. Омска составляет 183 балла и характеризуется движением в сторону формирования благоприятной среды. Для повышения данного показателя и улучшения позиций привлекательности г. Омска среди городов России повышение пропускной способности существующей городской улично-дорожной сети является особенно важной.

Повышение пропускной способности – это задача, которая требует комплексного подхода к эффективным методам решения. При повышении пропускной способности уменьшаются заторы на улицах и дорогах, увеличиваются их технико-экономические показатели².

Для описания требований и методологии были приняты ряд документов, которые изменялись с течением времени. Некоторые из нормативов утратили свою силу либо были

¹Руководство по определению первоочередных направлений развития городской среды с помощью индекса качества городской среды / Индекс качества городской среды инструмент для оценки качества материальной городской среды и условий ее формирования / Минстрой России; 2025 [обновлено 01.11.2025, процитировано 01.11.2025]. Доступно: <https://индекс-городов.рф/#/>

²Рюмкин М.А. Интеллектуальная система для регулирования транспортных потоков на основе машинного зрения: магистерская диссертация: 08.04.01 // Рюмкин Максим Александрович; ФГБОУ ВО «СибАДИ». Омск, 2025. С. 85 : ил. 23.

усовершенствованы и стали базовыми для действующих на данный момент:

– ВСН 25-86. «Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (утратил силу)³;

– «Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог» (утратил силу)⁴;

– ОДМ 218.4.0005–2010. «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах»⁵;

– ОДМ 218.2.020–2012. «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог» (отменен)⁶;

– ОДМ 218.2.072–2016. «Методические рекомендации по оценке пропускной способности и уровней загрузки автомобильных дорог методом компьютерного моделирования транспортных потоков» (отменен)⁷;

– ОДМ 218.2.071–2016. «Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений при строительстве и реконструкции автомобильных дорог»⁸;

– ГОСТ Р 70124–2022. «Дороги автомобильные общего пользования. Организация и безопасность дорожного движения на автомагистралях и скоростных автомобильных дорогах. Общие требования»⁹;

– Распоряжение Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению мониторинга дорожного движения»¹⁰;

– СП 396.1325800.2018. «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» (с

Изменениями № 1, 2, 3)¹¹.

На основе анализа нормативных документов пришли к выводу, что методология определения пропускной способности в городских условиях описывалась подробно для разных условий в отмененном документе ОДМ 218.2.020–2012⁶. Действующие нормативные документы, регламентирующие условия проектирования улично-дорожной сети, не описывают требования и методологию определения пропускной способности. ОДМ 218.4.0005–2010⁵ является единственным нормативным документом, который можем применять при решении поставленной нами задачи.

На основе анализа нормативных документов выявлена зависимость от параметров, которые оказывают влияние на пропускную способность:

- 1) повышение автомобилизации населения;
- 2) проведение ремонтных работ на участках автомобильных дорог и городских улиц (дорог);
- 3) дорожно-транспортные происшествия;
- 4) смена постоянной зоны притяжения транспортных средств (праздничные, спортивные мероприятия);
- 5) перенастройка длительных фаз светового цикла;
- 6) погодные условия;
- 7) ненормативные параметры ширины полосы движения;

³ ВСН 25-86. Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах (отменен) // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс».

⁴ Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог (утратил силу) // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.

⁵ ОДМ 218.4.0005–2010. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.

⁶ ОДМ 218.2.020–2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог (отменен) // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс».

⁷ ОДМ 218.2.072–2016. Методические рекомендации по оценке пропускной способности и уровней загрузки автомобильных дорог методом компьютерного моделирования транспортных потоков (отменен) // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс».

⁸ ОДМ 218.2.071–2016. Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений при строительстве и реконструкции автомобильных дорог // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.

⁹ ГОСТ Р 70124–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Организация и безопасность дорожного движения на автомагистралях и скоростных автомобильных дорогах. Общие требования // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.

¹⁰ Распоряжение Министерства транспорта РФ от 27 декабря 2022 г. № АК-337-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению мониторинга дорожного движения» // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обращения: 01.11.2025.

¹¹ СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (с Изменениями № 1, 2, 3) // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.

8) движения автопоездов по запрещенным для их использования улицам и дорогам;

9) создание множества «карманов» для стихийной парковки транспортных средств вдоль городских дорог и улиц;

10) ограничение скоростного режима.

При решении задач повышения пропускной способности необходимо учитывать тип исследуемого объекта: городская дорога или дорога общего пользования. Далее относится объект исследования к линейному участку, является ли примыканием (в одном и разных уровнях) либо пересечением (в одном и разных уровнях).

Были выявлены основные способы и инструменты для повышения пропускной способности:

1) интеллектуальные транспортные системы;

2) налог на заторы (ограничение проезда);

3) развитие общественного транспорта;

4) расширение городских улиц и дорог;

5) выделение полосы движения для общественного транспорта;

6) перенастройка длительных фаз светового цикла;

7) организация кругового движения на перекрестках;

8) строительство транспортных развязок;

9) повышение ровности покрытия и нормативных параметров шероховатости.

Вопросам повышения пропускной способности были посвящены многие научные исследования. Перечислим основные работы, которые выделили в рамках своего исследования.

В работе Д.С. Мартяхина¹² рассматривались вопросы повышения пропускной способности при проектировании съездов городских

транспортных развязок в условиях движения плотных транспортных потоков.

С.Н. Боярский в своей диссертации¹³ рассматривал вопросы повышения эффективности функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого значения коэффициента загрузки движением на основе критерия минимума задержки транспорта.

В научном труде¹⁴ П.А. Пегина представлены исследования повышения эффективности и безопасности эксплуатации автомобильного транспорта на основе увеличения фактической пропускной способности автомагистрали за счет улучшения характеристик движения транспортных средств и учета природных факторов.

Я.А. Селиверстов в своем исследовании¹⁵ представил решения задачи повышения качества управления городской транспортной сети в условиях неопределенности внешней информационной среды путем разработки новых и совершенствования существующих моделей управления городскими транспортными потоками.

В своем научном труде¹⁶ А.А. Кураксин представил решения по совершенствованию методов оценки эффективности дорожного движения на основе применения технологии мезоскопического моделирования транспортных потоков, разработав методики учета влияния инцидентов на пропускную способность элементов улично-дорожной сети.

П.И. Поспелов, Д.С. Мартягин, Т.К. Комарова в работе [1] представили исследование возможности увеличения пропускной способности городской улично-дорожной сети на основе комплексного подхода к оценке параметров транспортных потоков при использовании интеллектуальных систем управления.

¹² Мартягин Д.С. Повышение пропускной способности при проектировании съездов городских транспортных развязок : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Мартягин Дмитрий Сергеевич; Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). М., 2008. 156 с. : ил. РГБ ОД, 61:08-5/1281Им.

¹³ Боярский С.Н. Повышение эффективности функционирования пересечений автомобильных дорог с высоким значением коэффициента загрузки движением: дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.01 / Боярский Сергей Николаевич; Ур. гос. ун-т путей сообщ. Екатеринбург, 2015. 135 с.

¹⁴ Пегин П.А. Повышение эффективности и безопасности эксплуатации автомобильного транспорта на основе увеличения пропускной способности автомагистралей: дис. д-ра техн. наук: 05.22.10: Орлов. гос. техн. ун-т. Орел, 2011. 345 с.: ил. РГБ ОД, 71 12-5/182.

¹⁵ Селиверстов Я.А. Модели управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.01. С.-Петербург. гос. ун-т гражданской авиации. Санкт-Петербург, 2015. С. 179.

¹⁶ Кураксин А.А. Совершенствование методов оценки эффективности организации дорожного движения на основе применения технологии мезоскопического моделирования транспортных потоков: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.22.10 / Кураксин Антон Александрович; Орлов. гос. ун-т. Орел, 2017. С. 192.

Исследователями С.В. Алексиковым и М.И. Альшановым [2] были представлены вопросы повышения эффективности функционирования улично-дорожной сети г. Волгограда. В качестве основных показателей эффективности приняты уровень загрузки дорог движением автотранспорта и средней скорости транспортных потоков в зависимости от числа полос движения магистралей, режима работы светофоров, интенсивности движения, длины перегона между регулирующими перекрестками, состояния проезжей части.

А.В. Антюфеев и С.В. Алексиков в статье «Повышение пропускной способности магистралей линейно-протяженных городских территорий» [3] представили исследования, связанные с особенностями современного этапа планировочного развития транспортных коммуникаций линейной градостроительной системы «Большой Волгоград».

Группа исследователей Р.Р. Минниханов, В.В. Девятков и др. в своем научном труде [4] представили «...усовершенствованный подход к построению имитационных моделей сегментов улично-дорожной сети для повышения эффективности функционирования дорожной инфраструктуры автоматизации выработки управляющих решений при различных сценариях изменения интенсивности потоков транспортных средств, параметрах работы светофорных объектов и организации дорожного движения в целом».

Вопросы внедрения интеллектуальных транспортных систем являются одним из основных инструментов для регулирования и контроля за движением транспортных средств¹⁷. Потенциал ИТС достаточно высокий, но использование на сегодняшний день их функционала является неполноценным и решает в основном задачи контроля, надзора, мониторинга безопасности движения. Ученые Белгородского ИТ-кластера в своих исследовательских работах приводят различные подсистемы, которые решают проблемы по повышению пропускной способности. Каждая подсистема имеет свое назначение и направлена на работу в определенной области транспортных процессов¹⁸. Комплекс оборудован системой фотовидеофиксации, состоит из

светофора с контролером, обзорной камеры с подсветкой, камеры фиксации ГРЗ (государственные регистрационные знаки) с подсветкой, терминального сервера.

Группа ученых В.Д. Шепелёв, З.В. Альметова и др. Южно-Уральского государственного университета в работе [5] представила всесторонний обзор исследований, посвященных различным методам расчета и оптимизации «зеленых волн». Основная цель исследования заключается в уменьшении количества остановок и минимизации времени в пути с использованием распознавания и определения типов автомобилей на основе машинного зрения.

Журнал «Научные высказывания» представил статью [6], авторами которой являются С.С. Акимова и О.Ф. Васильева. В данной статье произведен анализ текущего состояния и перспективы развития ИТС в России и в мире. Авторы предполагают, что ИТС является ключевым элементом в процессе цифровизации транспортной отрасли, а также в решении проблем в населённых пунктах, связанных с городской мобильностью (аварийность, перегруженность транспортной сети и т.д.). Статья представляет собой актуализированное исследование проблемных зон в области ИТС. Ее значимость заключается в комплексном подходе к описанию как технологической основы ИТС, так и организационно-экономических условий для их масштабного внедрения.

Следующая работа выполнена группой челябинских ученых О.С. Фадиной, В.Д. Шепелевым и др. [7]. «В данном исследовании представлен детальный анализ параметров транспортного потока на регулируемых перекрестках с применением машинного зрения. На основе обработки видеопотоков обученной и оптимизированной нейронной сетью (YOLOv4) был проведен анализ данных по оценке пропускной способности полос с разрешенным движением только прямо, собраны характеристики перекрестков, а также разработана математическая модель расчета средней скорости групповых автомобилей для обеспечения безостановочного проезда регулируемого пересечения при координированном управлении дорожным движением» [7].

¹⁷ Интеллектуальные транспортные системы. ФКО «Дороги России». Сайт Министерства транспорта РФ: Доступно: <https://dr.rosavtdor.gov.ru/department/deyatelnost-dr/intellektualnye-transportnye-sistemy> (дата обращения: 01.11.2025).

¹⁸ «Белгородский ИТ-кластер Интеллектуальный трафик / Белгородский ИТ-кластер [Электронный ресурс] // Белгородский ИТ-кластер: Доступно: <https://digital.belregion.ru/deyatelnost/it-klaster/?ysclid=mgghq2hvxv2220377022> / (дата обращения: 01.11.2025).

В России, в области умных дорог и интеллектуальных транспортных систем, провели совместное исследование Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого и Сочинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. В статье [8] представлен успешный опыт реализации применения ИТС в направлении «умных дорог».

И.А. Чебыкин представил исследования по автоматизации мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения [9]. Разработка и анализ системы мониторинга дорожного движения, основанной на технологиях машинного зрения и методах кластерного анализа, представлена в научном труде И.Н. Пугачева [10].

Группа ученых Х.М.А. Асфур, Н.К. Горяев, В.И. Рассоха в статье [11] представили моделирование пропускной способности участка улично-дорожной сети с учётом формирования групп транспортных средств.

Ученые А.С. Акопов и Л.А. Бекларян в научной статье [12] представили эволюционный синтез реконфигурируемых многоуровневых дорожных сетей высокой пропускной способности с использованием многоагентного гибридного генетического алгоритма с поддержкой кластеризации. В следующей научном труде эта группа ученых исследует улучшение транспортного потока в дорожных сетях Манхэттена с помощью параллельного гибридного двухцелевого генетического алгоритма [13].

Г.И. Букреев в статье [14] предлагает метод сравнительной оценки транспортной связности городской агломерации и способы ее повышения в контексте целей устойчивого развития. М.Р. Якимов в научной статье [15] представил подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов, которая сможет повысить пропускную способность улично-дорожной сети.

Исследования показали, что такие приложения, как адаптивные сигналы светофора, информация о дорожном движении в режиме реального времени и системы управления дорожными ситуациями, могут сократить заторы до 20% и снизить уровень аварийности.

Европейский союз (ЕС) ERTICO-ITS Europe свидетельствует об успехах ИТС в снижении

пробок на дорогах и выбросов вредных веществ. Комплексный подход Европейского союза, включающий взаимосвязь между индивидуальными, общественными транспортными средствами, инфраструктурой (V2I), интеллектуальными сигналами светофора, показал положительные результаты в таких городах, как Копенгаген, Амстердам, и стал предметом для дальнейших обсуждений¹⁹.

Япония занимает лидирующие позиции в этой области благодаря информационно-коммуникационной системе транспортных средств (VICS), предоставляющей информацию о дорожном движении в режиме реального времени, что значительно сократило время в пути и повысило безопасность дорожного движения¹⁹.

В Австралии, особенно в таких городах, как Сидней, были отмечены положительные результаты использования ИТС. Для качественного результата внедрения ИТС исследователи подчеркивают необходимость проведения комплексных кампаний по просвещению общественности для получения максимальной выгоды¹⁹.

В условиях цифровизации строительной отрасли, многие труды как российских ученых, так и зарубежных, посвящаются направлению использования машинного зрения в действующих интеллектуальных транспортных системах для управления дорожным движением с учетом прогноза интенсивности движения автомобильного транспорта.

Китайские ученые Цзяньху Чжэн и Минфан Хуан в работе [16] для решения повышения пропускной способности автомобильной дороги предлагают использовать глубокое обучение для прогнозирования транспортного потока с помощью анализа временных рядов. Авторы разработали модель прогнозирования дорожного трафика на основе сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Предложенная модель сравнивалась с двумя классическими моделями прогнозирования (с моделью авторегрессионного интегрированного скользящего среднего (ARIMA) и моделью нейронной сети с обратным распространением ошибки (BPNN)).

Статья малайзиских ученых Нур Афиза Мат Разали, Нурайни Шамсаймон и др. [17] посвящена анализу методов оценки, подходов,

¹⁹ Мировой опыт применения системных решений в области ИТС: Сайт ФКУ «Дороги России». URL: <https://dr.rosavtodor.gov.ru/department/deyatelnost-dr/intellektualnye-transportnye-sistemy/mirovoj-opyt-vnedreniya-i-razvitiya-its?ysclid=mggi0pcaaf334181277> / (дата обращения: 01.11.2025).

методологии и алгоритмам, которые используются для прогнозирования транспортного потока. В статье представлен вывод о том, что наиболее распространёнными методами машинного обучения, применяемыми для прогнозирования транспортного потока, являются свёрточная нейронная сеть и модель с долгой и короткой краткосрочной памятью. Эффективность предложенных методов сравнивалась с эффективностью существующих базовых моделей.

Индийские ученые Bhartiya P., Bhatele M. и Woo A.A в статье [18] представили результаты исследования, которые могут послужить основой для разработки интеллектуальных транспортных систем, способных точно прогнозировать условия движения транспортных потоков, тем самым обеспечивая своевременную координацию и регулирование для уменьшения заторов и оптимизации.

Следующий научный труд индийских ученых Deekshetha H.R., Shreyas Madhav A.V., Tyagi A.K [19] посвящен разработке подхода повышения пропускной способности на основе сравнения данных по выбранному участку дороги города и определяет самые загруженные. Для решения поставленных задач предлагают использовать регрессионную модель для прогнозирования трафика с помощью машинного обучения, импортировав библиотеки Sklearn, Keras и TensorFlow.

Применение машинного зрения для анализа транспортного потока были посвящены работы канадских ученых Ting, Ta Jiun (Канада) [20], индийских ученых N. Parashuram и K. Vijayalakshmi N. [21].

Все исследования вышеперечисленных авторов еще раз подтверждает острую проблему, которая назрела на сегодняшний день как в мире, так и в России, в частности. Это подтверждает важность и актуальность тематики исследования.

Целью нашего исследования является разработка концепции интеллектуальной транспортной системы для повышения пропускной способности существующей транспортной сети путем регулирования транспортных потоков с применением машинного зрения.

Необходимо подтвердить адекватность и эффективность работы концепции на основе математического моделирования транспортных потоков в программном комплексе PTV VISSIM на объектах существующей транспортной сети г. Омска.

Задачи исследования:

1. Определение пропускной способности на исследуемом участке транспортной сети г. Омска.

2. Представление предполагаемой концепции алгоритмизированных процессов для интеллектуальных транспортных систем на основе машинного зрения в задачах повышения пропускной способности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках нашего исследования по повышению пропускной способности были намечены следующие мероприятия:

1) сбор исходных данных на исследуемом участке;

2) проведение учета интенсивности транспортных средств;

3) учет программы светофоров, аварийные участки;

4) возможность вариативности движения транспортных средств в условиях сложившейся городской застройки без реконструкции улиц и дорог, переустройства существующей улично-дорожной сети; перенастройка и корректировка светофорных циклов и (или) отдельно фаз; изменение организации дорожного движения; оптимизация пешеходного движения;

5) изменение количества полос движения в том или ином направлении с целью оптимизации дорожного движения в рамках внедрения предлагаемой концепции;

6) усовершенствование типов пересечений в одном или разном уровне автомобильных дорог;

7) повышение нормативных параметров покрытия проезжей части.

Рассматриваемый участок улично-дорожной сети находится в Центральном районе г. Омска. В границы рассматриваемого района попадают следующие улицы: ул. Интернациональная, ул. Фрунзе, ул. Орджоникидзе, ул. Гусарова, ул. Красный Путь, ул. Булатова, ул. Герцена, ул. Кемеровская. Сбор исходных данных проводился в течение одного месяца (20 рабочих дней). Обследования проводились в будние дни, в течение часа в утреннее и вечернее время часа пик. Учёт приводился путем фиксирования прохождения пешехода и проезда каждого транспортного средства через сечение, с дальнейшим занесением в шаблон учета интенсивности. В полевой журнал, который был составлен на основе ГОСТ

32965–2014²⁰ заносились данные о видах транспортных средств и их количестве. Для занесения количества пешеходов был разработан шаблон полевого журнала на основе карточки учета интенсивности движения пешеходов, утвержденный Распоряжением Министерства транспорта РФ от 27 декабря 2022 г. № АК-337-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению мониторинга дорожного движения»¹⁰.

Применение видеофиксации дало возможность более точно определить количество транспортных средств, которые проезжают через рассматриваемое поперечное сечение. Полученные данные стали основой для соз-

дания транспортной модели как цифрового двойника, использования данных для обоснования принятых проектных решений, учета транспортных средств и принятых решений об актуализации светофорных циклов.

Повышение пропускной способности на участке ул. Гагарина – мост им. 60-летия Победы осуществляется за счет внедрения интеллектуальной системы для регулирования транспортных потоков на основе машинного зрения. Были подготовлены картограммы транспортных потоков на основе данных по интенсивности движения 20 перекрестков исследуемой дороги (рисунок 1).

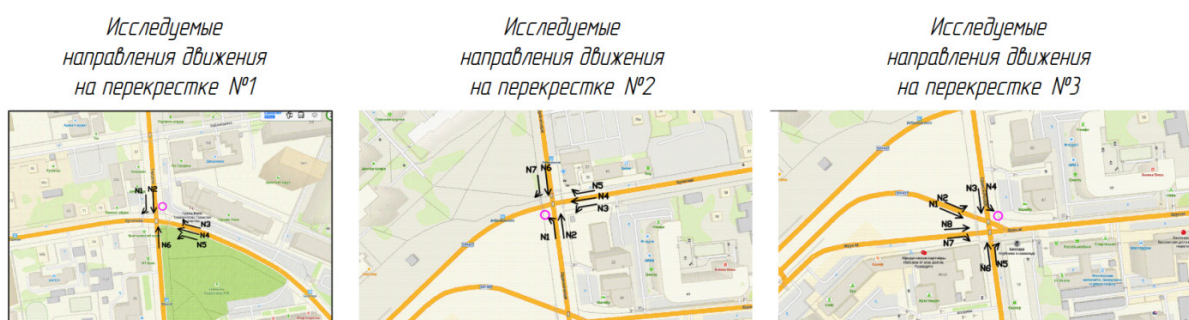


Рисунок 1 – Картограмма транспортных потоков на исследуемых перекрестках
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Map of traffic flows at the intersections under the study
Source: compiled by the authors.

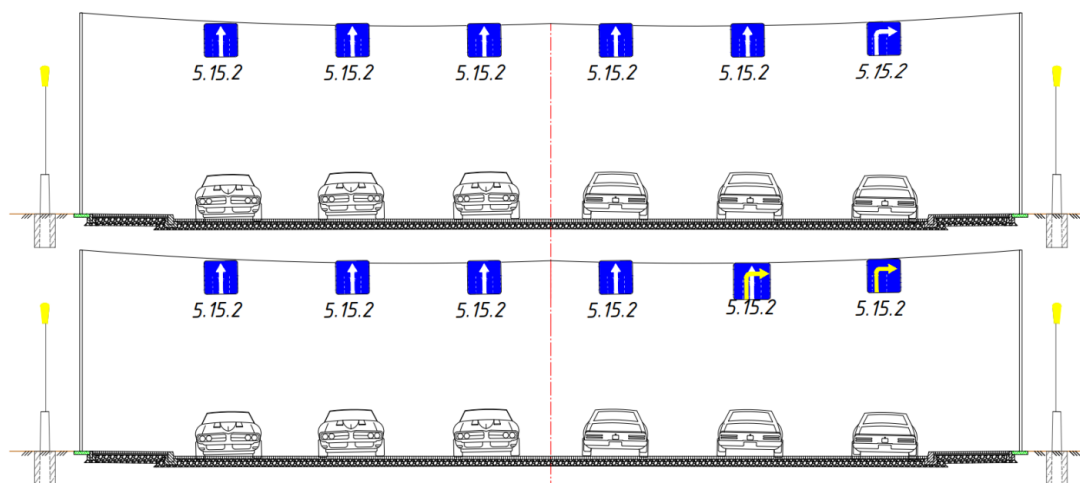


Рисунок 2 – Поперечный профиль автомобильной дороги с дорожными знаками группы 5.15
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Cross-section profile of a highway with road signs of 5.15 group
Source: compiled by the authors.

²⁰ГОСТ 32965–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока // ИС «Техэксперт: Интранет» / Консорциум «Кодекс». Дата обновления: 01.11.2025.



Рисунок 3 – План пути следования транспортных средств
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Vehicle route plan
Source: compiled by the authors.

Регулирование транспортных потоков в час пик на основе машинного зрения реализовано за счет переключаемых светодиодных знаков группы 5.15 (движение по полосам) (рисунок 2), изменения длительности фаз, а также элементов обустройства и разметки для дублирования измененной ситуации водителям транспортных средств. Данный комплекс предполагается внедрить на перекрестках и примыканиях, которые имеют светофорное регулирование на пути следования.

План пути следования существующий и измененный за счет внедрения в данную транспортную сеть комплекса представлен на рисунке 3.

Комплекс может предполагать работу автоматизированных и полуавтоматизированных режимов:

1) полностью автоматизированная система, которая будет учитывать количество единиц, проехавших через сечение дороги, и время проезда этих же средств до следующего сечения, расположенного на определенном расстоянии; «программный комплекс», в дан-

ном режиме интегрирован с существующими камерами, расположенными на перекрестках;

2) «программный комплекс» требует участия компетентных сотрудников-операторов, которые будут следить/отслеживать ситуацию по оборудованию фотовидеофиксации на рассматриваемом участке и принимать решения о необходимости включения комплекса для возможного альтернативного проезда транспортных средств.

Для более наглядного понимания была создана схема последовательности принятия решений от подготовительных данных до управления корректировкой пропускной способности. Для выявления факторов снижения пропускной способности проводится анализ исходных данных, объекта исследования, после описываются факторы, которые влияют на снижение пропускной способности. Оценка снижения пропускной способности осуществляется за счет определения фактической интенсивности движения, построения картограмм и определения уровня загрузки. Описанная схема представлена на рисунке 4.

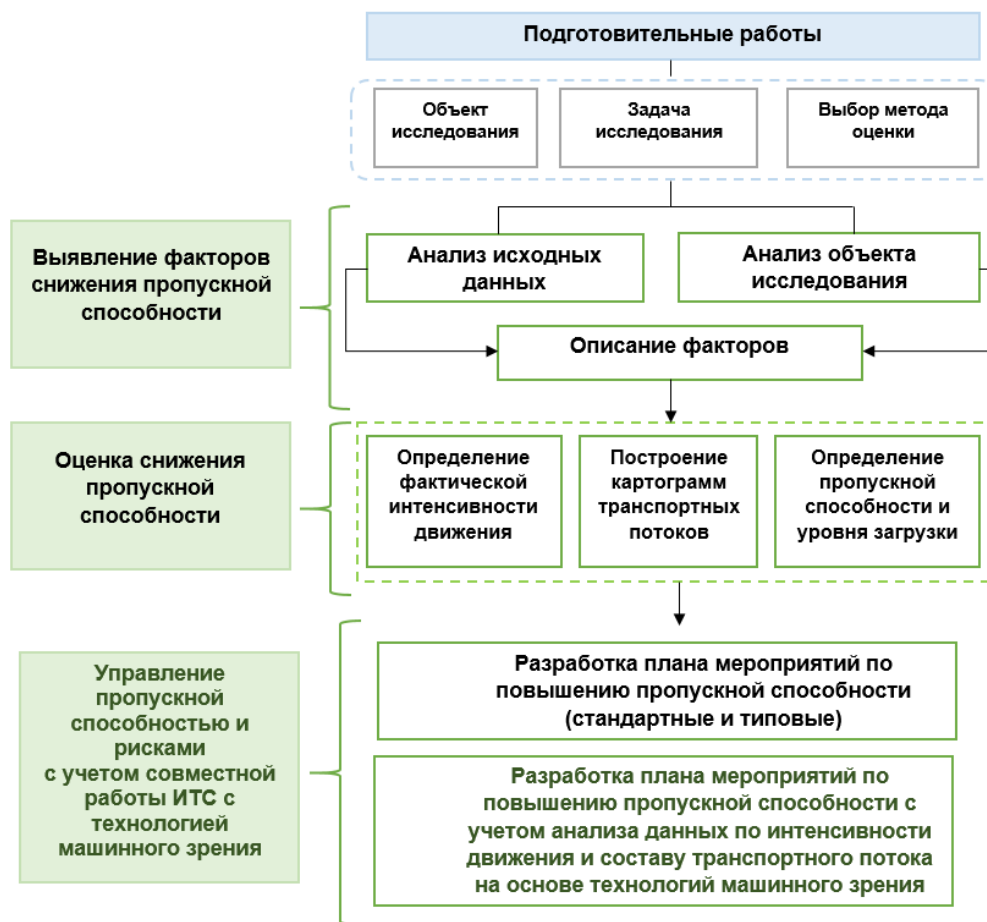


Рисунок 4 – Комплексная методика управления пропускной способностью
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Comprehensive methodology for managing traffic capacity
 Source: compiled by the authors.

Для оценки пропускной способности задействовали программный комплекс PTV Vissim. В микроскопическую модель транспортного потока заложены модели поведения за впереди идущим автомобилем и смены полосы движения. Результат имитации – это анимация движения транспорта в режиме онлайн на графических поверхностях и автономное перечисление различных транспортно-технических параметров. Возможно моделирование транспортных потоков на макроуровне.

Для корректной математической модели необходимо занести следующие данные в программный комплекс:

- фактическая интенсивность движения из полевых журналов в авт./ч и чел./ч;
- условия работы светофорных объектов;
- светофорная программа;
- данные о наличии пешеходного движения (в процессе моделирования расчетным пока-

зателем принималось время пересечения проезжей части пешеходами).

В ходе моделирования транспортных и пешеходных потоков было проанализировано входящее и исходящее количество транспортных средств и пешеходных потоков. На основе создания фактической ситуации было предложено аналитическим (предположительным) методом перераспределение транспортных потоков.

Данный комплекс позволил оценить существующую пропускную способность на улично-дорожной сети в Центральном районе г. Омска, а также послужил обоснованием в необходимости применения разрабатываемого комплекса по повышению пропускной способности. Математическая модель в программном комплексе PTV Vissim представлена на рисунках 5 и 6.

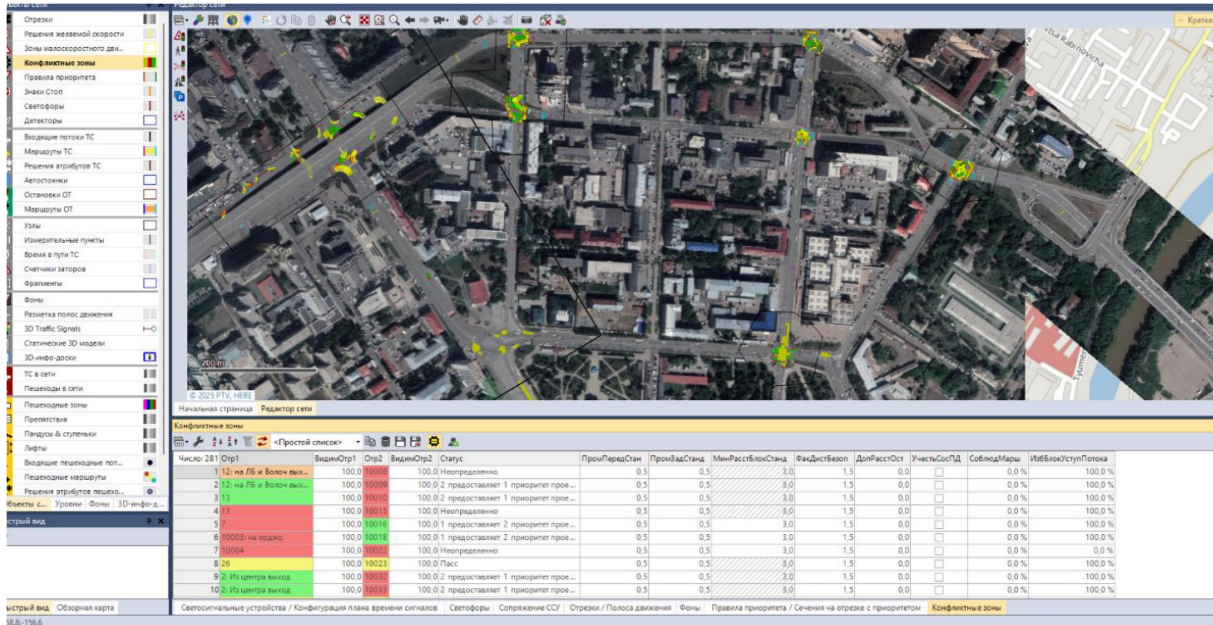


Рисунок 5 – Математическая модель в программном комплексе PTV Vissim
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Mathematical model in the PTV Vissim software package
 Source: compiled by the authors.

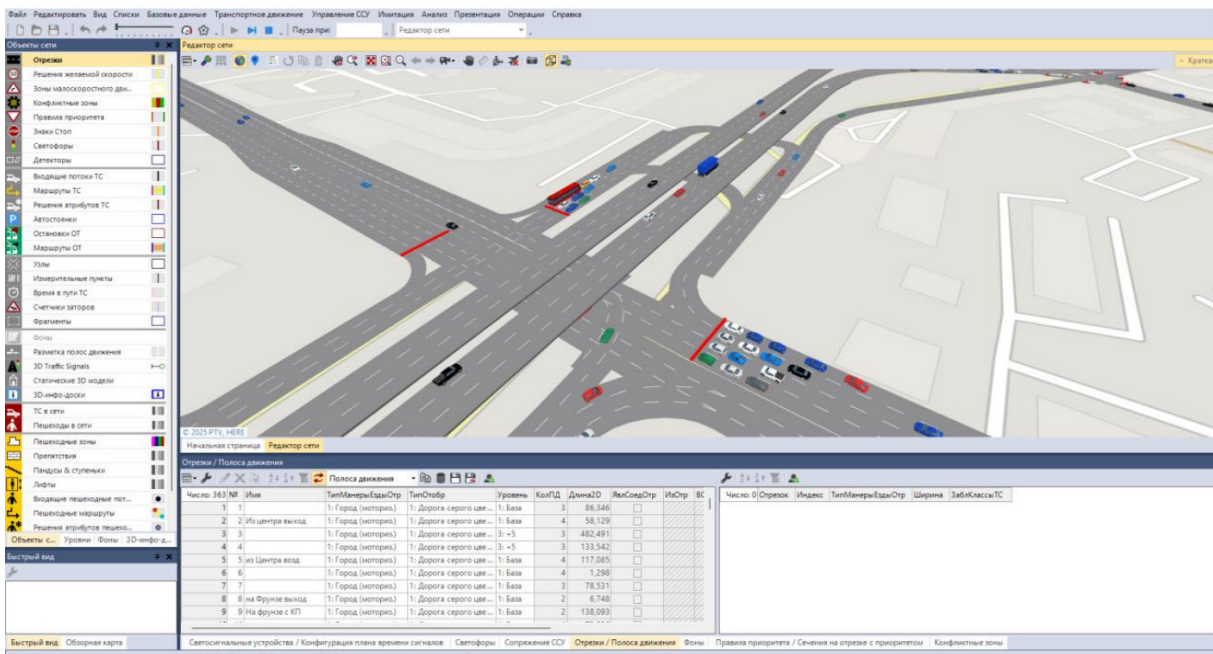


Рисунок 6 – Математическая модель в программном комплексе PTV Vissim, мост им. 60-летия Победы
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Mathematical model in the PTV Vissim software package, 60th Anniversary of Victory Bridge
 Source: compiled by the authors.

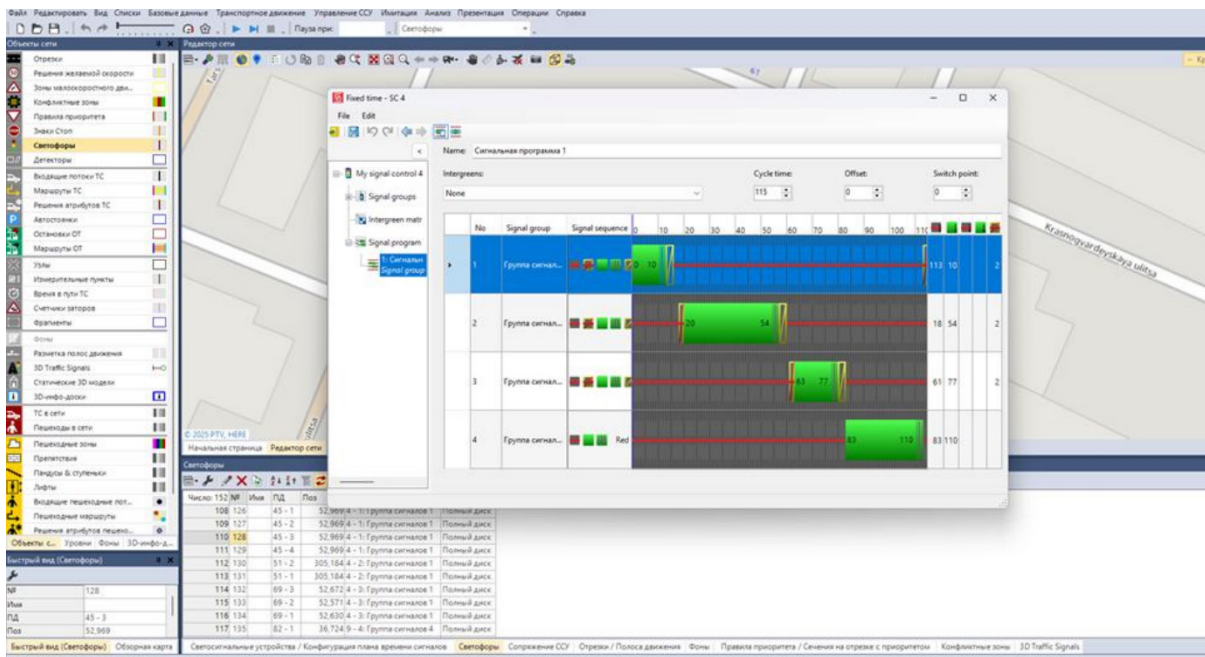


Рисунок 7 – Корректировка светофорных фаз на перекрестке ул. Интернациональная – ул. Герцена
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Adjustment of traffic light phases at the intersection of Internatsionalnaya Street and Herzen Street
 Source: compiled by the authors.

В ходе создания существующей математической модели помимо учетных транспортных средств также были учтены продолжительности фаз светофорных объектов. Результатом создания математической модели транспортных потоков послужил анализ созданной улично-дорожной сети.

Проанализировав вышеперечисленное, можно сделать вывод, что существующая транспортная сеть не в полной мере справляется с возникшей ситуацией на дорогах г. Омска. С самого начала имитации начинают образовываться заторы на 90% исследуемых перекрестков. Корректировка светофорных циклов не существенно меняет ситуацию, «распуская» одно из направлений движения, заторы на примыкающих улицах начинают увеличиваться. Тем самым можно подтвердить мнение о том, что «зеленая волна» не всегда удовлетворяет заданным потребностям и заторы начинают расти, создавая помехи на удаленных перекрестках от места корректировки светофорных фаз. Пример рабочего окна светофорного цикла показан на рисунке 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование транспортных потоков в дорожной отрасли имеет большое значение

для решений повышения пропускной способности улично-дорожной сети, безопасности и бесперебойности транспортных средств. Концепция предполагает перераспределение транспортных потоков на альтернативный путь движения за счет машинного зрения, искусственного интеллекта и дорожных знаков группы 5.15. В программном комплексе PTV Vissim смоделировано решение с учетом предлагаемой концепции.

Был проведен анализ для подтверждения жизнеспособности концепции путем сопоставления полученных результатов фактической смоделированной ситуации и с учетом внедренных предлагаемых мероприятий. Было выявлено, что после внедрения концепции основные показатели (время пути следования, максимальная и средняя длина заторов на рассматриваемых участках) для оценки заторов существенно сократили свои значения. Также об эффективности применяемой концепции говорит тепловая схема плотности.

Путем имитационного моделирования зафиксирован наиболее оптимальный временной интервал работы концепции, который составил ограничение работы модели в 20 мин. Данный промежуток позволяет как «распустить» потоки, так не допустить заторы в течение часа пик.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математические модели транспортных потоков дают актуальную и прогнозируемую информацию о «пробках», влиянии строительства новых дорог и изменении направлений движения, помогая заинтересованным сторонам принимать обоснованные решения. В городских условиях при застройке новых жилых комплексов (микрорайонов) необходимо учитывать транспортную обеспеченность и влияние прироста интенсивности движения за счет новых транспортных средств жителей, влияние в целом на пропускную способность транспортной сети города.

Развитие интеллектуальной системы, разработка усовершенствованных систем контроля и учета транспортных средств является важнейшим направлением исследований в области повышения пропускной способности транспортных потоков населенных пунктов.

Моделирование транспортных потоков является ключевым параметром для сокращения времени в пути следования, повышения логистических задач, снижения вредных выбросов от транспортных средств и улучшения психологического состояния водителей.

Преимущества предлагаемой концепции:

1) предполагаемая концепция не требует значительных вложений (реконструкция, строительство дорог) для повышения пропускной способности на улично-дорожной сети; необходимое оборудование предлагается интегрировать с существующими элементами обустройства, которые находятся в составе улицы: камеры фотовидеофиксации, стойки дорожных знаков, светофорные объекты;

2) имеет значительный эффект в области снижения вредных выбросов от транспортных в населенном пункте (наличие жилых домов, офисных помещений в непосредственной близости от проезжей части), улучшение психоэмоционального состояния водителей, снижение логистических затрат из-за пребывания в заторах;

3) предлагаемая концепция является гибкой, возможно применение во всех крупных городах.

Для реализации на практике данной концепции необходима финансовая поддержка (государственное финансирование/гранты/частные инвестиции), привлечение профильных специалистов (комплексная задача) требует более детальную проработку проекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комарова Т.К., Поспелов П.И., Мартыгин Д.С. Исследование параметров транспортного потока на элементах улично-дорожной сети в городских условиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 4(70):285–293. <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/70.25>
2. Алексиков С.В., Альшанова М.И. Повышение пропускной способности улично-дорожной сети г. Волгограда // Социология города. 2020. № 4. С. 58–68. <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/sotsiologiya-goroda/arhiv/2020-4/6/>.
3. Антюфеев А.В., Алексиков С.В. Повышение пропускной способности магистрали линейно-протяженных городских территорий // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 2. С. 128–134. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-2-128-134>
4. Минниханов Р.Р., Девятков В.В., Маряшина Д.Н. [и др.] Усовершенствованный подход при построении имитационных моделей сегментов улично-дорожной сети // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды XVI международной конференции. № 1. 2023. url: <https://mlsd2023.ipu.ru/proceedings/1145.pdf> (дата обращения: 07.10.2025). <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1145>
5. Шепелёв В.Д., Альметова З.В., Михальчук В.В., Слободин И.С. Современные методы организации дорожного движения в городах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2019. Т.13, № 4:С.186–194. <https://doi.org/10.14529/em190419>.
6. Акимова С.С., Васильева О.Ф. Интеллектуальные транспортные системы: обзор и перспективы // Научные высказывания. 2024. № 20 (67). С. 37–42. URL: https://nvjournal.ru/article/Intellektualnye_transportnye_sistemy_obzor_i_perspektivy (дата обращения: 01.11.2025).
7. Фадина О.С., Шепелёв В.Д., Варворкин М.А., Плюхин Л.Э. Повышение пропускной способности на регулируемых пересечениях за счет оптимизации скоростных режимов транспортных потоков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2023. Т. 17, № 3. С. 175–182. URL: <https://vestnik.susu.ru/em/article/view/13630> (дата обращения: 01.11.2025).
8. Дмитриев И.И., Кириллов А.М. Умные дороги и Интеллектуальная транспортная система // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 2(53). С. 7–28. <https://doi.org/10.18720/CUBS.53.1.EDN.YRUVIT>.
9. Чебыкин И.А. Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // Мир транспорта. Том 18, № 6. С. 74–87 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-74-87>

10. Пугачев И.Н., Тормозов В.С. Разработка и анализ системы мониторинга дорожного движения, основанной на технологиях машинного зрения и методах кластерного анализа // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4. С. 134–145. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_4_134

11. Асфур Х.М.А., Горяев Н.К., Рассоха В.И. Моделирование пропускной способности участка улично-дорожной сети с учётом формирования групп транспортных средств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 6. С. 74–88. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-74>

12. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Эволюционный синтез реконфигурируемых многоуровневых дорожных сетей высокой пропускной способности с использованием мультиагентного гибридного генетического алгоритма с поддержкой кластеризации // IEEE Access. Том 13. 2025. С. 53448–53474. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3554054>

13. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Улучшение транспортного потока в дорожных сетях Манхэттена с помощью параллельного гибридного двухцелевого генетического алгоритма // IEEE Access. Том 12. 2024. С. 19532–19552. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.336139>

14. Букреев Г.И. Метод сравнительной оценки транспортной связности городской агломерации и способы ее повышения в контексте целей устойчивого развития // Экономика и управление. 2023. Т. 29, № 11. С. 1382–1393. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-11-1382-1393>

15. Якимов М.Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (55). С. 107–113.

16. Zheng J., Huang M. Traffic Flow Forecast Through Time Series Analysis Based on Deep Learning // IEEE Access, vol. 8, pp. 82562-82570, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990738>

17. Razali N.A.M., Shamsaimon N., Ishak K.K. et al. Gap, techniques and evaluation: traffic flow prediction using machine learning and deep learning. *J Big Data* 8, 152 (2021). – <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00542-7>

18. Bhartiya P., Bhatele M., Woo A.A. A Machine Learning Approach for Predictive Analysis of Traffic Flow. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 2024. 5(5), 422–430. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i5.2024.1892>.

19. Deekshetha H.R., Shreyas Madhav A.V., Tyagi A.K. Traffic Prediction Using Machine Learning. In: Suma, V., Fernando, X., Du, K.L., Wang, H. *Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2022. vol 116. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9605-3_68

20. Ting Ta Jiun. University of Toronto. ProQuest Dissertations & Theses, 2021. Poonam Bhartiya, Mukta Bhatele, Akhilesh A. Waoo (Индия) [Bhartiya, P., Bhatele, M., and Woo, A.A. (2024). A Machine Learning Approach for Predictive Analysis of Traffic

Flow. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 5(5), 422–430.

21. Parashuram and K. Vijayalakshmi, “A Comprehensive Analysis of Road Traffic Prediction Using Machine Learning Algorithms,” 2024 First International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON), Tumkur, India, 2024, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/SSITCON62437.2024.10797035>

REFERENCES

1. Komarova T.K. Pospelov P.I., Martychin D.S. Study of traffic flow parameters on the elements of the road network in urban conditions. December 2024. *News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering* 4 (70): 285-293. <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/70.25>

2. Aleksikov S.V., Alshanova M.I. Increasing the capacity of the road network of Volgograd // *Sociology of the city*. 2020. No 4. S. 58-68. (In Russ.) <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/sotsiologiya-goroda/archiv/2020-4/6/>.

3. Antyufeev A.V. Increasing the throughput capacity of the highway of linearly extended urban areas // *Academia. Architecture and construction*. 2023. № 2. С. 128-134. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-2-128-134>

4. Minnikhanov R.R., Devyatkov V.V., Maryashina D.N. et al. Improved approach to building simulation models of road network segments // *Management of the development of large-scale systems (MLSD “2023): proceedings of the Sixteenth International Conference*. № 1. 2023. url: <https://mlsd2023.ipu.ru/proceedings/1145.pdf> (Accessed: 07.10.2025) (In Russ.) <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1145>

5. Shepelev V.D., Almetova Z.V., Mikhailchuk V.V., Slobodin I.S. Modern methods of traffic management in cities // *Bulletin of SUSU. Economics and Management Series*; 2019. Т. 13, № 4. С. 186–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/em190419>

6. Akimova S.S., Vasilyeva O.F. Intelligent transport systems: overview and prospects // *Scientific statements*. 2024; №20 (67). С. 37-42. (In Russ.) URL: https://nvjournal.ru/article/Intellektualnye_transportnye_sistemy_obzor_i_perspektivy. (Accessed: 01.11.2025)

7. Fadina O.S., Shepelev V.D., Varvorkin M.A., Plyukhin L.E. Increasing throughput at controlled intersections by optimizing the speed modes of traffic flows *Vestnik SUSU. Economics and Management Series*. 2023. Т. 17, № 3. С. 175–182. (In Russ.) URL: <https://vestnik.susu.ru/em/article/view/13630> (Accessed: 01.11.2025)

8. Dmitriev I.I., Kirillov A.M. Smart Roads and Intelligent Transport System [Text]. (In Russ.) <https://doi.org/10.18720/CUBS.53.1.2017>. С. 28

9. Chebykin I.A. Automation of Road Traffic Monitoring Using Computer Vision. *World of Transport*, 2020; Vol. 18, No. 6, pp. 74-87 (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-74-87>

10. Pugachev I.N., Tormozov V.S. Development and Analysis of a Road Traffic Monitoring System Based on Machine Vision Technologies and Cluster Analysis Methods. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2024; № 4. С. 134–145. (In Russ.) https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_4_134
11. Asfur H.M.A., Goryaev N. K., Rassokha V. I. Modeling the capacity of a street network section, taking into account the formation of groups of vehicles. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*. 2024; No. 6. P. 74–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-74>
12. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Evolutionary Synthesis of High-Capacity Reconfigurable Multilayer Road Networks Using a Multiagent Hybrid Clustering-Assisted Genetic Algorithm. in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 53448-53474, 2025; (In Russ.) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3554054>
13. Akopov A.S., Beklaryan L.A. Traffic Improvement in Manhattan Road Networks With the Use of Parallel Hybrid Biobjective Genetic Algorithm. in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 19532-19552, 2024; (In Russ.) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3361399>
14. Bukreev G.I. The method of comparative assessment of transport connectivity of an urban agglomeration and ways of its improvement in the context of sustainable development goals. *Economics and Management*. 2023.; Vol. 29. No. 11. P. 1382–1393. (In Russ.) <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-11-1382-1393>
15. Yakimov M.R. Approaches to the Formation of an Effective Route Network in Large Cities *Bulletin of the Ural State University of Railway Engineering*. 2022. No. 3 (55). Pp. 107-113. (In Russ.)
16. Zheng J., Huang M. Traffic Flow Forecast Through Time Series Analysis Based on Deep Learning. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82562-82570, 2020; <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990738>
17. Razali N.A.M., Shamsaimon N., Ishak K.K. et al. Gap, techniques and evaluation: traffic flow prediction using machine learning and deep learning. *J Big Data* 8, 152 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00542-7>
18. Bhartiya P., Bhatele M., Woo A.A.. A Machine Learning Approach for Predictive Analysis of Traffic Flow. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 2024; 5(5), 422–430. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i5.2024.1892>
19. Deekshetha, H.R., Shreyas Madhav, A.V., Tyagi, A.K. (2022). Traffic Prediction Using Machine Learning. In: Suma, V., Fernando, X., Du, K.L., Wang, H. (eds) *Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 116. *Springer, Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9605-3_68
20. Ting Ta Jiun., Poonam Bhartiya, Mukta Bhattele, Akhilesh A. Waoo. University of Toronto (Canada) ProQuest Dissertations & Theses, 2021. 28768284. A Machine Learning Approach for Predictive Analysis of Traffic Flow. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 2024. 5(5), 422–430.
21. Parashuram and K. Vijayalakshmi, “A Comprehensive Analysis of Road Traffic Prediction Using Machine Learning Algorithms,” 2024 First International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON), Tumkur, India, 2024, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/SSITCON62437.2024.10797035>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Шнайдер В.А. Поиск научных исследований, организационные вопросы в ходе написания статьи.

Рюмкин М.А. Разработка концепции, создание транспортной модели, анализ жизнеспособности предлагаемой концепции.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Schneider V.A. Contribution to the overall work refers to the search for the relevant scientific literature, managing organizational issues when writing the manuscript.

Ryumkin M.A. Contribution to the overall work refers to the concept development, building the transport model, analyzing the concept viability.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шнайдер Виктория Александровна – доц. кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

SPIN-код: 7971-6163,

e-mail: wihor@mail.ru

Рюмкин Максим Александрович – инженер-проектировщик автомобильных дорог ООО «Автоторпроект» (644112, г. Омск, ул. Степанца, д.3, офис 35П).

e-mail: m.ryumkin99@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Schneider Victoria A. – Associate Professor, Department of Project Management and Information Modeling in Construction, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, ave. Mira, Omsk, 644050).

SPIN-code: 7971-6163,

e-mail: wihor@mail.ru

Ryumkin Maxim A. – Highway Design Engineer, Avtodorproekt LLC, (3 Stepants Street, office 35P, Omsk, 644112).

e-mail: m.ryumkin99@bk.ru

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-130-157>
EDN: LMWXDA



УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУСТОТ ПРИ РАСЧЕТЕ КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ

Т.Ю. Гагарина, Н.П. Александрова, А.С. Александров ✉

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Параметры прочности и деформативности асфальтобетона существенно зависят от его температуры. В широком диапазоне варьирования температуры асфальтобетон проявляет упруго-вязко-пластические свойства. Это приводит к тому, что на макроуровне при увеличении температуры прочность асфальтобетона и его сопротивляемость деформации уменьшается. В условиях отрицательных температур асфальтобетон проявляет свойства хрупкого тела, а при положительных температурах асфальтобетон нужно рассматривать как квазихрупкий материал. Следовательно, в практику расчета нежестких дорожных одежд и проектирование состава асфальтобетонов необходимо внедрять материальные константы микроуровня (поверхностную энергию, энергию разрушения, предельные значения коэффициентов интенсивности напряжений или трещиностойкость, вязкость разрушения). Выполнен анализ методов расчета дорожных одежд, применяемых в практике дорожного строительства. Сформулирована цель работы.

Методы и материалы. Приведены сведения о концепциях хрупкого и квазихрупкого разрушения А. Гриффитса и Дж. Ирвина, описан критерий роста трещины в виде J-интеграла Черепанова – Райса. Сделан вывод, что одним из вариантов расчета асфальтобетонных слоев дорожной одежды при нулевой и отрицательной температуре является применение теории хрупкого разрушения А. Гриффитса. Применение механики хрупкого разрушения позволяет определить критическое напряжение при заданном размере дефектов в структуре асфальтобетона и, наоборот, критическую длину трещины при заданном напряжении. Следующим этапом должен стать расчет по коэффициентам интенсивности напряжений или энергии разрушения, применяемые в рамках линейно-упругой механики разрушения, но учитывающей образование в вершине трещины пластической зоны с малыми необратимыми деформациями. Классические формулы А. Гриффитса содержат материальные константы, в том числе модуль упругости, величина которого зависит от содержания воздушных пустот. На микроуровне воздушные пустоты представляют собой концентраторы напряжений. Поэтому учет содержания воздушных пустот при определении модуля упругости асфальтобетона, применяемого в расчете дорожной одежды, является актуальной задачей, имеющей практическую значимость. Выполнен обзор научных работ по определению энергетических констант горячих асфальтобетонов в зависимости от вариации различных факторов.

Результаты. Приведены результаты расчета критической длины трещины для горячих асфальтобетонов на битумах марок БНД, соответствующие допуску по содержанию воздушных пустот. Из анализа результатов расчета следует, что увеличение содержания воздушных пустот приводит к снижению модуля упругости асфальтобетона и уменьшению критической длины трещины. Расчеты выполнены для трех величин удельной поверхностной энергии.

Заключение. Полученные результаты позволяют более детально производить расчет дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, содержание воздушных пустот, критическая длина трещины, энергия разрушения, расчет асфальтобетонных покрытий

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 29.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

© Гагарина Т.Ю., Александрова Н.П., Александров А.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Все 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: Гагарина Т.Ю., Александрова Н.П., Александров А.С. Учет влияния содержания воздушных пустот при расчете критической длины трещины в асфальтобетоне // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 130-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-130-157>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-130-157>

EDN: LMWXDA

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF AIR VOID CONTENT IN THE CALCULATION OF CRITICAL CRACK LENGTH IN ASPHALT CONCRETE

Tatyana Yu. Gagarina, Natalya P. Aleksandrova, Anatoliy S. Aleksandrov ✉

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

✉ corresponding author
aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The strength and deformation parameters of asphalt concrete are significantly dependent on its temperature. Over a wide temperature range, asphalt concrete shows elastic, viscous and plastic properties. This leads to the fact that at the macrolevel, with the rise of temperature, asphalt concrete strength declines and its deformation resistance decreases. Under temperature conditions below zero, asphalt concrete behaves as a brittle material, while at temperatures above zero, it should be considered a quasi-brittle material. Consequently, it is necessary to implement microlevel material constants (surface energy, fracture energy, critical stress intensity factors or crack toughness, fracture viscosity) into calculation practice for flexible pavements and content design of asphalt concrete mixes. The analysis of pavement design methods currently used in road construction practice has been performed. The objective of the work has been formulated.

Materials and methods. Information on the concepts of brittle and quasi-brittle fracture by A. Griffith and J. Irwin has been provided, and the criterion of crack growth in the form of the Cherepanov-Rice J-integral has been described. It is concluded that one approach for calculating asphalt concrete layers in pavements at zero and subzero temperatures is the application of A. Griffith's theory of brittle fracture. The application of brittle fracture mechanics allows to determine the critical stress for the given defect size in the asphalt concrete structure, and conversely, the critical crack length for the given stress. The next stage should involve calculations based on stress intensity factors or fracture energy, applied within the framework of linear elastic fracture mechanics, but taking into the account the formation of a plastic zone with small irreversible deformations at the crack tip. Classical Griffith formulas contain material constants, including the elastic modulus, the magnitude of which depends on the air void content. At the microlevel, air voids act as stress concentrators. Therefore, attention to the air void content in determining the elastic modulus of asphalt concrete used in pavement design is a relevant task with a practical significance. A review of scientific works on determining the energy constants of hot mix asphalt concrete in accordance with the variation of different factors has been conducted.

Results. Critical crack length calculation results for hot mix asphalt based on BND bitumen grades, corresponding to permissible air void content standards, are presented. Analysis of the calculation results shows that the increase in air void content leads to the decrease in the elastic modulus of asphalt concrete and to the reduction in the critical crack length. Calculations have been performed for three values of specific surface energy.

Conclusion. The obtained results allow to make more detailed calculation of the road pavement design.

KEYWORDS: asphalt concrete, air void content, critical crack length, fracture energy, calculation of asphalt-concrete pavements

© Gagarina Tatyana Yu., Aleksandrova Natalya P., Aleksandrov Anatoliy S., 2026



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

The article was submitted: November 07, 2025; approved after reviewing: January 29, 2026; accepted for publication: February 16, 2026.

All 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. Gagarina T.Yu., Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S. Accounting for the influence of air void content in the calculation of critical crack length in asphalt concrete *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 130-157. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-130-157>

ВВЕДЕНИЕ

В дорожном строительстве широкое распространение получили асфальтобетонные смеси и асфальтобетон. Основной областью применения этих материалов является строительство нежестких дорожных одежд с усовершенствованным покрытием капитального и облегченного типов. Важнейшим элементом обеспечения работоспособности дорожной конструкции с асфальтобетонными слоями на протяжении срока службы является этап проектирования дорожной одежды. Именно на этом этапе, состоящем из конструирования и расчета, создается будущая дорожная одежда. В настоящее время специалисты дорожной отрасли пересмотрели сроки по проведению работ по ремонту и капитальному ремонту нежестких дорожных одежд. В результате такого пересмотра срок проведения мероприятий по капитальному ремонту увеличился до 24 лет, а период времени до ремонта стал не менее 12 лет, что закреплено в стандарте ГОСТ Р 58861–2020¹.

Изменения в правилах конструирования и расчета дорожных одежд, регламентируемые новым стандартом ГОСТ Р 71404–2024², главным образом затрагивают материаловедческие аспекты. Здесь отметим введение большого количества новых материалов, включая основные типы асфальтобетонных смесей, и современных технологий, позволяющих создавать конструктивные элементы повышенной прочности и более высокой сопротивляемости деформированию. К таким технологиям отнесем стабилизацию грунтов, армирование слоев дорожной одежды геосинтетикой и стальными сетками, а также их разделение геотекстильными материалами. Достоинством нового стандарта ГОСТ Р 71404 является ре-

гламентация параметров прочности и деформируемости новых материалов.

В плане модификации расчета нежесткой одежды, регламентированного новым стандартом, наметилась тенденция перехода от расчетной схемы двухслойной системы к расчету многослойного полупространства, которая приведена в ГОСТ Р 71404, прил. Д. Кроме того, специалисты, поддерживающие такой переход [1], сообщают, что «Расчетный общий модуль упругости конструкции, рассчитанный по решению для многослойного полупространства, ниже рассчитанного по упрощенной методике на 28,9%». Такая разница в результатах расчета объясняется тем, что применение расчетной схемы двухслойной системы требует поэтапного введения в расчет новых конструктивных слоев. При этом не принимается во внимание распределяющая способность дорожной конструкции. В реальных дорожных одеждах нагрузка распределяется так, что с глубиной диаметр площадки D_z , несущей нагрузку, увеличивается, а традиционный расчет этот факт игнорирует. Как известно, в нормативном методе расчета диаметр площадки принимается одинаковым для любого рассчитываемого слоя $D_0 = 37,1$ см. Это приводит к тому, что при прочих равных условиях отношение толщины (h_i) любого из конструктивных слоев, за исключением верхнего, к диаметру D_0 будет всегда больше своего действительного значения, то есть $h_i/D_0 > h_i/D_z$. В этом случае общий модуль упругости на поверхности конструктивного слоя, вычисленный с использованием отношения h_i/D_0 , будет всегда больше значения, рассчитанного по отношению h_i/D_z . Несоответствие расчетной схемы двухслойного полупространства реальным аэродромным и дорожным конструкциям было подчеркнуто еще в 1943 г., оно приведено в виде обсужде-

¹ ГОСТ Р 58861–2020 (введен впервые) Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 мая 2020 г. № 228-ст М.: Стандартинформ, 2020. 15 с.

² ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 141 с.

ния во второй части известной работы Д.М. Бурмистера³ на стр. 146–148. В этой дискуссии приняли участие известные и выдающиеся специалисты старшего поколения: L.A. Palmer, E.S. Barber, A. Casagrande и T.A. Middlebooks. В бывшем СССР также был поднят этот вопрос, он обсуждается и в настоящее время [1, 2, 3]. Расчетная схема многослойной системы, регламентируемая в ГОСТ Р 71404, прил. Д, включает 6 слоев дорожной одежды и подстилающее полупространство в виде седьмого слоя бесконечной толщины. Эта схема многослойного полупространства сопровождается стандартной постановкой задачи, состоящей в необходимости определения шести неизвестных, в качестве которых в системе цилиндрических координат приняты четыре напряжения (σ_z , σ_r , σ_θ , и τ_{rz}) и два перемещения (w и u). При решении задачи для каждого слоя выполняют поиск функций, входящих в выражение для каждой из шести неизвестных и удовлетворяющих бигармоническому уравнению при заданных граничных условиях на поверхности и границах раздела слоев. При этом стандарт ГОСТ Р 71404 содержит известную оговорку о трудоемкости решения и необходимости использования специальных программных продуктов. Однако в ГОСТ Р 71404 нет пояснений, о каком именно программном продукте идет речь. Поэтому специалисту-практику необходимо тратить время на ознакомление с возможностями программного продукта и математического аппарата. Это создает некоторую неопределенность в выборе программного продукта и, как следствие, математического аппарата. Хорошо известно, что решения разных авторов базируются на разной математике, которая может отличаться только нюансами, но даже эти незначительные отличия приведут к разным результатам расчета. Здесь мы привели факт, хорошо известный специалистам-практикам в области проектирования (расчета дорожных одежд), вытекающий из

анализа материалов выдающегося труда⁴, написанного специалистами старшего поколения (см. разделы под авторством М.Б. Корсунского). Суть описанных нами различий в решениях задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) двухслойной системы от решений теории упругости для многослойной среды состоит в поиске способа сокращения искомых функций, применяемых для расчета компонент тензора напряжений (σ_z , σ_r , σ_θ , и τ_{rz}) и двух перемещений (w и u). Например, традиционное решение Б.И. Когана⁵ и ⁶ для двухслойной системы основано на поиске четырех функций (A_p , B_p , C_p , и D_i) для определения НДС в верхнем слое и двух функций (A_i и B_i), используемых при расчете НДС в нижнем слое (для этого слоя $C_i=0$ и $D_i=0$). С увеличением количества слоев возрастает число решаемых уравнений, так что для полупространства из n слоев количество уравнений составит $2 \times (2 \times n - 1)$. То есть в задаче о НДС двухслойной системы решают шесть уравнений, а задача о НДС трехслойной системы потребует решения 10 уравнений и т.д. Решение М.Б. Корсунского о НДС трехслойного полупространства основано на применении представления К.К. Туроверова⁷, позволяющего вместо функций A_p , B_p , C_p , и D_i использовать только две. Следовательно, в решении М.Б. Корсунского применено приближение, тогда возникает вопрос: «Каково отличие результатов расчета по приближенному решению от более строгого решения с использованием всех функций A_p , B_p , C_p , и D_i ». Проблема в том, что ответа на этот вопрос нет, вследствие того, что решений о НДС трехслойной системы с функциями A_p , B_p , C_p , и D_i не получено. По этому поводу М.Б. Корсунский писал: «Однако получаемые формулы даже при $n=3$ несоизмеримо более громоздки и сложны, чем существующие зависимости (здесь имеются в виду зависимости для двухслойной системы). Попытка реализовать их на ЭВМ не привела к удовлетворительным результатам, так как вы-

³ Burmister D.M. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways // Proceedings, Highway Research Board. 1943. Vol. 23. Pp. 126–148.

⁴ Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Н.Н. Иванов [и др.] М.: Транспорт, 1973. 328 с

⁵ Коган Б.И. Напряжения и деформации многослойных покрытий // Вопросы начертательной геометрии и ее приложения: сб. науч. тр. ХАДИ. Харьков: ХАДИ, 1953. Выпуск 14. С. 33–46.

⁶ Коган Б.И. Напряжения и деформации двухслойных и многослойных покрытий: автореф. ... д-ра техн. наук. Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. 32 с.

⁷ Туроверов К.К. К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния упругого слоистого полупространства // В кн. Труды Ленинградской лесотехнической академии им. С.М. Кирова. Ленинград: Изд-во Ленинградской лесотехнической академии им. С.М. Кирова, 1962. Выпуск 55. С. 87–101.

числительный процесс по полной программе длителен, неэкономичен и подчас неустойчив. Встал вопрос о рациональном пути реализации решения». Как сказано выше, такое решение найдено применением представления К.К. Туроверова. Аналогичный прием использован в алгоритме решения о НДС семислойного полупространства, описанном в ОДМ 218.3.1.005–2021⁸. То есть в решении о НДС многослойного полупространства по методам ГОСТ Р 71404 и ОДМ 218.3.1.005 предполагается использование упрощения К.К. Туроверова. Тогда, принимая во внимание разницу в расчетах по схемам двухслойного и многослойного полупространства в 28,9%, нужно задаться вопросом, какая часть этой разницы обусловлена применением приближений в решении, и какая часть этой погрешности приходится на применение расчетной схемы двухслойной системы. Обратим внимание, что граничные условия на поверхности двухслойного и многослойного полупространства одинаковые, и они никоим образом не соответствуют факту наличия чаши прогибов (имеется в виду наличие напряжений под нагруженной площадкой и их отсутствие за пределами площадки, передающей нагрузку). Также обратим внимание на допущение о параллельности контактирующих слоев двухслойной и многослойной системы, откуда вытекает отсутствие учета шероховатости поверхностей слоев на их контакте. А это ключевой вопрос в верной постановке контактной задачи, шероховатости играют существенную роль в обеспечении контакта. Учет шероховатости контактирующих поверхностей ставит под сомнение существование гладкого контакта и позволяет утверждать, что взаимодействие шероховатостей усиливает спаянный контакт. К нашим замечаниям следует добавить замечания специалистов старшего поколения. Одним из таких замечаний является утверждение о нелинейном деформировании зернистых материалов. В работе [4] даны конкретные рекомендации по учету данного явления. Если принять во внимание мнение авторов работы [4], то решение должно базироваться на законах нелинейной теории упругости. Кроме того, дорожно-строительные материалы, в том числе асфальтобетоны, проявляют выраженные вязкие свойства. Это тре-

бует учета влияния продолжительности нагрузки. Одним из способов учета этого явления может быть определение значений модулей упругости при разных продолжительностях напряженного состояния. Об этом нам вполне обоснованно сообщают авторы работы [5], показывая, что модули упругости, применяемые для проектирования дорожных одежд в пределах городской улично-дорожной сети, должны количественно отличаться от значений, применяемых в ГОСТ Р 71404 для проектирования дорожных конструкций на внегородских транспортных объектах. Здесь речь идет о поиске решения в упруго-вязкой постановке. Продолжая далее, можно вспомнить законы изменения объема и формы, являющиеся основами механики деформируемого твердого тела. Тогда соблюдение закона изменения формы предполагает решение упругопластической задачи, так как деформации сдвига носят необратимый характер. При малых напряжениях сдвига эти деформации малы, но на вопрос об их величине и продолжительности накопления отвечает теория приспособляемости. Методика ГОСТ Р 71404 основана на линейной теории упругости, которая не может дать ответ на перечисленные нами доводы. Все сказанное нами относится к методике определения общего модуля упругости дорожной одежды. Нужно отметить, что активно обсуждается вопрос о правомерности использования логарифмической зависимости, рекомендуемой ГОСТ Р 71404, для вычисления минимального требуемого значения общего модуля упругости [6].

Другой особенностью нормативного расчета по ГОСТ Р 71404 является функция усталости, применяемая для расчета сопротивления усталостному разрушению от растяжения при изгибе. Усталостная функция описывает уменьшение прочности с увеличением суммарного числа расчетных нагрузок, прикладываемых в течение срока службы. Особенностью функции является то, что прочность от растяжения при изгибе приобретает нулевое значение тогда, когда суммарное число нагрузок становится равным бесконечности. С позиций теории усталости, рассматривающей прочность на макроуровне, это так. Однако если перейти на микроуровень и принимать во внимание размеры дефектов в структуре

⁸ ОДМ 218.3.1.005–2021. Проектирование жестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. М.: Росавтодор, 2021. 148 с.

асфальтобетона, то станет очевидным факт, что для трещины определенной длины существует критическое напряжение. И, наоборот, каждой величине напряжения соответствует критический размер дефекта. Поведение материалов на микроуровне описывает теория трещин, состоящая из двух основных разделов: механики хрупкого разрушения и механики квазихрупкого разрушения.

По мнению авторов настоящей публикации, определение критических размеров дефектов в структуре асфальтобетона является крайне важным элементом расчета слоев дорожной одежды. Дело в том, что во многих регионах РФ до исчерпания усталостной прочности от действия транспортной нагрузки асфальтобетонное покрытие разрушается путем распространения температурных трещин, а после выполнения ремонта в процесс разрушения включаются и отраженные трещины. Расстояния между такими трещинами уменьшаются за счет появления новых трещин в период эксплуатации. Попытки разработки метода расчета асфальтобетонного слоя на температурную трещиностойкость и стойкость к образованию отраженных трещин, конечно же, предпринимались специалистами дорожной отрасли. Огромный вклад внесли В.В. Мозговой⁹ и В.А. Кретов¹⁰, посвятив этому вопросу диссертационные исследования и большое количество публикаций. Однако специфика асфальтобетонного покрытия в его большой протяженности, что в совместном влиянии с температурой приводит к возникновению больших температурных напряжений и вызывает разрушение конструктивного слоя.

В нашей работе мы хотим предпринять попытку расчета критических размеров дефектов в горячих асфальтобетонах. Для этого задействуем теорию трещин. Особенностью предлагаемого нами варианта расчета будет учет влияния содержания воздушных пустот в пределах, допускаемых ГОСТ Р 58406.2–2020¹¹, на критическую длину дефекта. Для достижения поставленной цели авторы предлагают выполнить компиляцию двух фундаментальных теорий: концепции хрупкого разрушения

А. Гриффитса и концепции повреждаемости Качанова – Работнова. Поясняя необходимость такого решения, отметим, что теория А. Гриффитса позволяет вычислить критическую длину остроконечной микротрещины, а теория повреждаемости предназначена для оценки влияния повреждений на показатели механических свойств материала и их усталостную долговечность. Хорошо известно, что согласно концепции Л.М. Качанова, с увеличением суммарной площади, занятой повреждениями, в пределах поперечного сечения, напряжение в материале возрастет. Также справедлива гипотеза Ж. Леметра, согласно которой модуль упругости материала уменьшается по мере увеличения поврежденности Ю.Н. Работного. Следовательно, чем больше в асфальтобетоне воздушных пустот, тем больше он поврежден, а значит, имеет меньший модуль упругости. Также известно, что в формулы А. Гриффитса, предназначенные для расчета критического напряжения и критической длины трещины, содержат модуль Юнга материала, который является модулем упругости. Причем с увеличением модуля упругости значения обоих критических параметров возрастают. Отсюда следует простой вывод, что с увеличением содержания воздушных пустот в асфальтобетоне критические значения напряжения и длины трещины уменьшаются.

Основная задача нашей работы – дать математическое описание этой идеи и получить первые ориентировочные результаты расчета критической длины трещины. Очевидной перспективой развития этой работы является постановка экспериментов по определению энергии и вязкости разрушения, что даст возможность рассматривать свойства различных асфальтобетонных смесей в пластической зоне вершины трещины. Это прямой выход на оптимизацию составов асфальтобетонных смесей путем их проектирования на микроуровне, преследующем цель увеличения энергии и вязкости разрушения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В начале настоящего раздела обсудим применимость теории трещин и рассеянных

⁹ Мозговой В. В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. Киев, 1996. 41 с.

¹⁰ Кретов В. А. Концепция автодорожного обеспечения эффективного функционирования системы трубопроводов Западной Сибири: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.13. Тюмень, 1999. 417 с.

¹¹ ГОСТ Р 58406.2–2020 (взамен ПНСТ 184–2019) Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Общие технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2020 г. № 192-ст М.: Стандартинформ, 2020. 27 с

повреждений к оценке прочности асфальтобетона, а затем разъясним наше применение этих теорий. Начнем с теории трещин, в которой созданы две принципиально разные концепции: хрупкого и квазихрупкого разрушения. Первая – это концепция хрупкого разрушения А. Гриффитса, она описана в работах по изучению прочности стекол¹² и металлов¹³. В своем исследовании А. Гриффитс обратил внимание на несоответствие теоретической прочности материалов с результатами, получаемыми при их испытании. Свой вывод А. Гриффитс подкрепил данными расчета и эксперимента, указав, что в наиболее благоприятном случае наблюдаемое в опыте напряжение разрыва составляет менее 10%, а энергия разрыва – менее 1% от их теоретических значений. Приняв во внимание, что среднее значение энергии деформации по результатам опытов на растяжение мало по сравнению с теоретической энергией, А. Гриффитс приходит к выводу о неравномерности распределения энергии в момент разрыва. Значит, в местах образования трещин должна быть очень высокая концентрация той или иной формы энергии. Достижение такой высокой концентрации энергии, по А. Гриффитсу, возможно только в трех случаях. Первый случай состоит в том, что материал неоднороден и между его различными составляющими может существовать взаимное поверхностное натяжение* достаточной величины.

Второй – объясняется тем, что материал может испытывать серьезные первоначальные напряжения. Третий – заключается в том, что структура материала может иметь дефекты в виде небольших трещин, образовавшихся либо в процессе изготовления, либо при последующей обработке. Две первые гипотезы в работе А. Гриффитса не рассматриваются, а все внимание уделено наличию в материале микротрещин. Условие развития трещины состоит в энергетическом балансе.

$$\frac{\partial}{\partial l}(W - U) = 0, \quad (1)$$

где W – потенциальная энергия деформации пластины, U – поверхностная энергия трещины, l – полудлина трещины.

Дальнейшее решение задачи А. Гриффитса сводится к выводу зависимости, позволяющей оценить критическое напряжение, приводящее к разрыву трещины при заданной ее длине. В результате получены формулы для расчета критической величины напряжения при плоском напряженном состоянии (случай тонкой пластины) и для плоского деформированного состояния (случай толстой пластины). Соответственно, эти формулы имеют вид:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot l}}; \quad \sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot l \cdot (1 - \mu^2)}}, \quad (2)$$

где γ – удельная поверхностная энергия; она равна энергии, необходимой для образования единицы площади новой поверхности, и зависит от температуры, давления, окружающей среды. Для металлов величина γ составляет порядка 1 Дж/м²; E – модуль Юнга, под которым можно понимать продольный модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Из выражений (2) вытекает выражение для определения критической длины трещины для заданного напряжения. Эти формулы имеют вид:

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_r^2}; \quad l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_r^2 \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (3)$$

Формулы (3) являются основополагающими зависимостями, позволяющими оценить критическую длину трещины. Условием распространения трещины является достижение ею критической длины. По А. Гриффитсу трещина стабильна, если ее размер меньше критической длины. Однако если длина трещины при приложенном напряжении σ_r становится

¹² Griffith A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A. 1921; 221:163–198.

¹³ Griffith A.A. The theory of rupture. Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. 1924; 55–63.

* Здесь авторы поясняют, что этот вывод, сделанный Гриффитсом, вытекает из формулировки его концепции, в которой поверхность, ограничивающая твердое тело, наделяется поверхностным натяжением, подобно тому, как это имеет место в жидкостях. Поверхностное натяжение подразумевает наличие соответствующего количества потенциальной энергии, а возникновение трещины или расширение ранее существовавшей трещины, обусловленные действием напряжения, требуют добавления определенного количества энергии, пропорционального площади новой поверхности. Критерием процесса разрушения принято считать, что добавление энергии происходит без какого-либо увеличения общей потенциальной энергии системы.

равной критическому значению, то трещина с высокой скоростью распространяется в материале. Согласно общепринятому мнению, скорость распространения трещины в материале при критических напряжениях примерно составляет 60–70% от скорости звука в данном материале.

Формулы (3) не учитывают влияние усталостных процессов, возникающих в материале под действием нагрузки. Поэтому одним из путей развития теории А. Гриффитса стал учет влияния усталости на рост трещины в докритическом состоянии. Разработано достаточно большое количество математических моделей, связывающих модуль упругости асфальтобетона с параметрами циклической нагрузки и показателями физических свойств асфальтобетона [7, 8, 9, 10, 11]. Эти модели можно применить в зависимостях (2) и (3). Тогда получим, что чем больше число приложенных нагрузок, тем меньше модуль упругости асфальтобетона и меньше критическая длина трещины. Однако есть нюанс. Дело в том, что разработка таких моделей требует большого объема экспериментальных данных, которые в зарубежных университетах, дорожных департаментах и лабораториях накапливались десятилетиями. Дорожная отрасль России в 2020 г. перешла на горячие асфальтобетоны, применяемые в Евросоюзе и США, и практически полностью, за редким исключением, отказалась от отечественных асфальтобетонов, выпускаемых по ГОСТ 9128. Поэтому результаты исследований, выполненные представителями отечественных научных школ за многолетний период, оказались неактуальны, а данных по результатам испытания нововведенных горячих асфальтобетонов еще не накоплено в необходимом количестве. Следовательно, возникает острая необходимость в разработке своего метода учета влияния усталостных процессов на критические значения напряжения и длины трещины. Для этого мы предлагаем объединение теории хрупкого разрушения и теории повреждаемости с применением принципа деформационной эквивалентности поврежденного и неповрежденного тела. Это позволит уточнить механическое поведение асфальтобетонов в период отрицательных температур. Применяв принцип деформационной эквивалентности в зависимостях (3), получим

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_r^2}; \quad l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_r^2 \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (4)$$

где D – поврежденность асфальтобетона; E – модуль упругости неповрежденного асфальтобетона.

Для вычисления поврежденности D можно воспользоваться решением, полученным в работе [12], выполненной совместно с В.В. Чусовым. Особенностью этого решения является увеличение D при возрастании числа расчетных нагрузок. Тогда по мере увеличения поврежденности D критическая длина трещины будет уменьшаться. Недостатком зависимости (4) является отсутствие учета влияния содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетона E . Этот недостаток связан с тем, что содержание воздушных пустот в построенном из горячей асфальтобетонной смеси покрытии должно быть в пределах от 2 до 7%. Так как степень уплотнения асфальтобетона по площади конструктивного слоя неодинакова, то критическая длина трещины в структуре покрытия будет тем меньше, чем больше содержание воздушных пустот. Отсюда следует, что вероятность распространения трещины в конструктивном слое тем больше, чем больше содержание воздушных пустот. Попытку устранения этого недостатка предпримем после обзора критериев механики квазихрупкого разрушения и критериев роста усталостных трещин.

В классической механике эффект постепенного увеличения размера трещины, имеющей докритическую длину, называют квазихрупким разрушением. Первыми концепциями этой теории стали два критерия «подростания» трещины в материале, предложенные Дж. Ирвином¹⁴. Основным двигателем развития трещины по Дж. Ирвину является энергетическая интенсивность G , которая при превышении критического значения G_c вызовет рост трещины. Тогда трещина будет расти, если выполнено условие $G \geq G_c$. Другой мерой возможного движения трещины в материале стал коэффициент интенсивности напряжения (КИН), получивший обозначение K . Ирвин показал, что независимо от формы образца, размера трещины и приложенной нагрузки, напряженное состояние вблизи вершины трещины может быть охарактеризовано одним параметром – КИН. Условием медленного подростания тре-

¹⁴ Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Journal of Applied Mechanics. 1957. Vol. 24 № 3. Pp. 361–364.

щины является достижение величиной КИН предельного значения, называемого критической интенсивностью напряжений или трещиностойкостью (K_{IC}). Этот предельный параметр стал новой константой материала. Такой критерий разработан для каждого из трех типов трещин (I, II и III). В результате появилось три КИН (K_I , K_{II} и K_{III}) и три параметра материала, ограничивающие значения этих КИН, предельные величины (K_{IC} , K_{IIc} и K_{IIIc}).

Необходимость решения задач в условиях пластичности при возникновении больших деформаций потребовала разработки нового критерия роста трещины. Актуальность этой задачи связана с тем, что линейно-упругая механика разрушения (ЛУМР) Ирвина учитывает образование у вершины трещины пластической зоны, но базируется на положении о малости такой зоны по сравнению с размерами трещины и образца. Когда это положение не выполняется, ЛУМР становится неприменимой. Такой критерий в виде J -интеграла предложил Дж. Райс¹⁵. Этот интеграл характеризует энергию, рассеиваемую при росте трещины в упругопластической среде, то есть энергию, необходимую для роста трещины на единицу площади. Данный интеграл является инвариантом, то есть он не зависит от выбора контура интегрирования вокруг трещины. Распространение трещины начинается тогда, когда J -интеграл достигает критического значения J_{IC} .

Необходимо отметить фундаментальный вклад работ Г.П. Черепанова^{16, 17} в исследовании распространения трещины в упругопластической среде. В своих разработках Г.П. Черепанов искал величину, которая являлась бы характеристикой энергетического состояния вершины трещины и была бы инвариантной относительно выбора контура интегрирования. В результате был выведен интеграл, представляющий собой интеграл по замкнутому контуру, окружающему вершину трещины, и включающий в себя компоненты, связанные с напряжением, деформацией и перемещением. Интеграл Черепанова был представлен как мера энергии, выделяющейся при росте трещины на единицу площади. Этот интеграл является критическим параметром, определяющим начало и скорость роста трещины.

Фундаментальные основы механики квазихрупкого разрушения и концепции роста трещин при больших пластических деформациях стали применяться в теории роста усталостных трещин. Общий вид уравнений, описывающих рост усталостных трещин, имеет вид:

$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma, l, a), \quad (5)$$

где l – длина трещины; N – количество приложенных нагрузок или циклов; σ – обычно диапазон изменения напряжения ($\Delta\sigma$) или максимальное напряжение в цикле (применительно к металлическим деталям и изделиям), а применительно к асфальтобетонам этот параметр может быть более сложным и учитывать как величину напряжения от расчетной нагрузки, так и ее характер (например, время действия, зависящее от скорости и площади распределения нагрузки, а в более сложном понимании и от физических констант материала покрытия); a – параметр материала.

Так как формула (5) описывает изменение длины трещины в зависимости от числа циклов N и других параметров (σ , a), то чтобы определить длину трещины после приложения конечного числа нагрузок n , нужно функцию $f(\sigma, l, a)$ проинтегрировать по dN в пределах от нуля до n . Здесь отметим, что мы использовали самое простое пояснение решения задачи. Особенностью реальных функций $f(\sigma, l, a)$ является наличие в них параметров, например КИН, зависящих от длины трещины. Поэтому в теории усталостного роста трещин уравнения достаточно громоздки и сложны и требуют перед выполнением интегрирования предварительной работы по выражению одних параметров через другие.

Аналогичный подход применен нами совместно с В.В. Чусовым для расчета поврежденности Ю.Н. Работного и модуля упругости поврежденного асфальтобетона в работе [12]. В этой работе мы исходили из предположений, что изменение поврежденности ΔD или модуля упругости ΔE_D можно представить степенными функциями в виде

$$\Delta D = a \cdot n^{-1}; \quad \Delta E_D = b \cdot n^c, \quad (6)$$

¹⁵ Rice J.R. The localization of plastic deformation. // Theoretical and Applied Mechanics. 1976, 207–220.

¹⁶ Черепанов Г.П. О распространении трещин в сплошной среде // Прикладная математика и механика. 1967. Т. 31, № 3. С. 476–488.

¹⁷ Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

где a , b и c – коэффициенты, учитывающие уровень напряжённого состояния и тип материала.

$$\Delta E_D = -b \cdot n^c. \quad (7)$$

Тогда, интегрируя выражения (6) и (7) по n в пределах от единицы до конечного числа расчетных нагрузок N , получим

$$D_0 + a \cdot \int_1^n n^{-1} dn = D_0 + a \cdot \ln(N), \quad (8)$$

где D_0 – поврежденность асфальтобетона воздушными пустотами (в данном случае), доля единицы.

$$D_N = D_0 + b \cdot \int_1^n n^c dn = D_0 + b \cdot \frac{N^{c+1} - 1}{c+1}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_D &= E_0 \cdot \left(1 - b \cdot \int_1^n n^c dn \right) = \\ &= E_0 \cdot \left(1 - b \cdot \frac{N^{c+1} - 1}{c+1} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где E_0 – начальный модуль упругости асфальтобетона, учитывающий содержание в нем допустимого количества воздушных пустот (например, СВП=0,02–0,07), МПа.

Из анализа зависимостей (9) и (10) вытекает, что поврежденность Ю.Н. Работнова D определяется вторым слагаемым в формуле (9) или вычитаемым в выражении (10). То есть поврежденность D составляет

$$D = b \cdot \frac{N^{c+1} - 1}{c+1}. \quad (11)$$

Учитывая формулу (11) в зависимости (10), приходим почти к классической зависимости. Выполнив преобразования, получим

$$E_D = E_0 \cdot (1 - D). \quad (12)$$

Отличие формулы (12) от классической зависимости Ж. Леметра, используемой в уравнениях (4), состоит в том, что модули E_0 и E не одно и то же. В выражении (4) модуль упругости E представляет собой модуль упругости неповрежденного материала. В формуле (12) E_0 представляет собой модуль упругости услов-

но неповрежденного асфальтобетона, то есть здесь полагается, что, хотя асфальтобетон и содержит допустимое количество воздушных пустот, эти пустоты не влияют на снижение модуля упругости и рост поврежденности до тех пор, пока не начнут прикладываться нагрузки. Вообще-то это так называемая гипотеза о начальном состоянии, она вводится часто и в разных областях механики. Но, строго говоря, лучше обходиться без такой гипотезы. Раньше мы не могли этого сделать из-за того, что изготовить образцы с нулевым содержанием воздуха не удалось. Такие образцы необходимы для определения модуля упругости асфальтобетона с нулевой пористостью. На практике такой асфальтобетон к применению в дороге не допускают, но значения данного модуля упругости нужны в формуле (12). Таким образом, модуль упругости асфальтобетона с нулевым содержанием воздушных пустот представляет собой некоторую абстракцию, состоящую в том, что такой модуль нужен для расчета в формуле (12), на практике асфальтобетона с таким модулем нет и быть не может.

До недавнего времени мы вынуждены были пользоваться гипотезой о начальном состоянии. Но в совместной работе с В.В. Чусовым и Р.Х. Муртазинным [13] мы нашли способ вычисления этого модуля упругости E и модуля упругости $E_{\text{свп}}$, то есть модуля упругости асфальтобетона с учетом конкретного содержания воздушных пустот. В работе [13] выполнены расчеты модулей упругости асфальтобетона с учетом различного содержания воздушных пустот, допускаемого стандартами РФ. Наше предложение состоит в том, что модуль упругости эталонного асфальтобетона можно рассчитать, используя тот же принцип деформационной эквивалентности поврежденной и сплошной среды. Тогда, если примем обозначения работы [13], содержание воздушных пустот СВП (единица измерения – доля единицы), модуль упругости асфальтобетона с учетом допустимого содержания воздушных пустот $E_{\text{свп}}$, модуль упругости эталонного абсолютно плотного асфальтобетона E_{max} , то эти параметры связаны зависимостью

$$E_{\text{max}} = \frac{E_{\text{свп}}}{1 - \text{СВП}}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что вычисление искомой величины E_{max} может быть выполнено по результатам определения модуля упругости $E_{\text{свп}}$ при известном содержании воздуш-

ных пустот. Отсюда вытекает алгоритм постановки эксперимента: изготовление образцов из асфальтобетонной смеси, определение опытным путем СВП, определение лабораторными испытаниями $E_{\text{СВП}}$ и расчет модуля E_{max} . Далее следует статистическая обработка данных выборки частных значений модулей упругости E_{max} , при которой нужно не упустить из вида, что при вычислении величины E_{max} задействуются две характеристики, определяемые опытным путем (это СВП и $E_{\text{СВП}}$). Поэтому количество степеней свободы (K) при статистической обработке результатов нужно определять разностью числа определений E_{max} (m) и числа 2, соответствующего числу определяемых характеристик в зависимости (13), то есть $K=m-2$. Использование формулы (13) в выражениях (4) приводит к учету влияния СВП на критическую длину трещины, которая определится по зависимостям:

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{\text{max}} \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)}{\pi \cdot \sigma_r^2};$$

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{\text{max}} \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)}{\pi \cdot \sigma_r^2 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (14)$$

Анализируя формулы (4) и (14), отметим, что в выражениях (4) учитывается влияние поврежденности (D), обусловленной действием транспортных нагрузок, а в зависимостях (14) к влиянию поврежденности D добавлен учет начального содержания СВП. При этом зависимости (4) и (14) не учитывают повреждаемость асфальтобетона от климатических факторов, действия температуры и ее перепадов, циклы замораживания и оттаивания асфальтобетонного покрытия в период перехода температуры через ноль градусов по шкале Цельсия. От воздействия климатических факторов в асфальтобетоне тоже возникают повреждения, которые можно в совокупности описать поврежденностью D_{cl} (нижний индекс cl – сокращение от английского climate). Тогда, согласно принципу Л.М. Качанова, фактическое напряжение в асфальтобетоне, поврежденном климатическими воздействиями, $\sigma_{r(cl)}$ определяется по формуле

$$\sigma_{r(cl)} = \frac{\sigma_r}{1 - D_{cl}} \quad (15)$$

Безусловно, что зависимость (15) необходимо учесть в выражениях (14), при этом нужно не упустить из вида, что напряжения, вычисляемые по формуле (15), необходимо

возвести во вторую степень. Выполнив преобразования, получим, что

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{\text{max}} \cdot (1 - D_{cl})^2 \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)}{\pi \cdot \sigma_r^2};$$

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{\text{max}} \cdot (1 - D_{cl})^2 \cdot (1 - \text{СВП}) \cdot (1 - D)}{\pi \cdot \sigma_r^2 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (16)$$

Таким образом, применение одного и того же принципа деформационной эквивалентности позволило учесть основные факторы, влияющие на снижение модуля упругости асфальтобетона в условиях эксплуатации дороги. Безусловно, каждая из разновидностей повреждений, раскрытых нами, нуждается в исследованиях и экспериментальном определении математической функции, описывающей влияние рассматриваемого фактора на уменьшение модуля упругости. Таким образом, требуется большой объем работы. Нужно сказать, что применяемому нами способу определения поврежденности от действия транспортной нагрузки D существует альтернатива. Альтернативный способ представляет собой принцип линейного суммирования повреждений. Этот метод в среде специалистов-дорожников получил широкое применение, он используется Е.В. Угловой и ее учениками [14, 15, 16] для оценки остаточного прочностного ресурса асфальтобетонных конструктивных слоев, а также в исследованиях П.А. Пегина, Д.В. Капского и Ю.В. Буртыля [17, 18] для прогнозирования изменения ровности покрытия по показателю IRI, и в работах иностранных специалистов [19, 20, 21, 22]. В нашей работе применяется принцип Качанова – Работного – Леметра. Формула (13) анализировалась в работе [13], в результате чего мы пришли к выводу, что результаты экспериментального определения модуля $E_{\text{СВП}}$ будут отличаться от данных ГОСТ Р 71404. Различие, скорее всего, будет незначительным и обусловленным тщательным учетом влияния СВП на величину модуля упругости. Поэтому в формуле (13) вместо величины $E_{\text{СВП}}$ нужно применить значения модулей упругости $E_{\text{ГОСТ}}$, регламентируемые ГОСТ Р 71404, а параметр СВП необходимо определить величиной СВП_{ГОСТ}, при которой в ГОСТ Р 71404 определены модули упругости. При таких условиях расчета формула (13) примет вид

$$E_{\text{max}} = \frac{E_{\text{ГОСТ}}}{1 - \text{СВП}_{\text{ГОСТ}}} \quad (17)$$

В расчете значений E_{\max} параметр $СВП_{ГОСТ}$ принят равным 0,04 для горячих асфальтобетонных покрытий и 0,05 для горячих асфальтобетонных оснований. Решая поставленную задачу расчета критической длины трещин в асфальтобетоне в начальный период эксплуатации, отметим, что в этих условиях поврежденности D_{cl} и D должны принимать значения, близкие к нулевым. Поэтому, положив в формулах (16) $D_{cl}=0$ и $D=0$, получим выражения для расчета критической длины трещины для напряжения σ , возникающего от действия температуры в первый по счету период эксплуатации. Так как напряжение σ представляет собой напряжение на макроуровне, то его предельная величина ограничивается начальной величиной предела прочности на растяжение при изгибе R_0 , регламентированного ГОСТ Р 71404 для каждого типа асфальтобетона. С учетом этого первая из формул (16) примет вид

$$l_{cr} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{\max} \cdot (1 - СВП)}{\pi \cdot R_0^2} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{ГОСТ} \cdot (1 - СВП_{ГОСТ})}{\pi \cdot R_0^2} \quad (18)$$

В формуле (18) известны практически все параметры, необходимые для нашего расчета. Исключением является удельная поверхностная энергия γ , она тождественна энергии, необходимой для образования единицы площади новой поверхности, что позволяет определить этот материальный параметр опытным путем. В нашей стране экспериментальные методы определения энергетических параметров разрушения асфальтобетона разрабатывал А.А. Малышев (ФГБОУ ВО «СибАДИ»). Также отметим труды специалистов ФГБОУ ВО «ДГТУ» [23, 24, 25, 26], в которых предложены экспериментальные методы оценки энергетических параметров асфальтобетонного покрытия и всей дорожной конструкции в целом. В зависимости (18) необходимо использовать энергетический параметр γ , устанавливаемый лабораторными экспериментами, подобными тем, что ставил А.А. Малышев. Здесь отметим, что опыты по определению энергетических параметров

разрушения материалов в России распространены достаточно широко, в том числе и в строительной отрасли. Однако в области дорожного строительства масштабные и систематические исследования, подобные тем, что были проведены А.А. Малышевым, встречаются реже. А.А. Малышев ставил опыты по разрушению асфальтобетонных образцов с надрезами, моделирующими трещину, на протяжении двадцатилетнего периода. Эти исследования, охватывающие значительный временной интервал и объем данных, представляют собой уникальный вклад в российскую науку о дорожных материалах. В то время работа А.А. Малышева не нашла поддержки у ведущих специалистов РФ, но, несмотря на это, работа А.А. Малышева заложила важные основы для понимания процессов разрушения асфальтобетона и могла бы стать отправной точкой для дальнейших исследований в этой области. Со временем журналы испытаний, научно-технические отчеты, составленные А.А. Малышевым, были утеряны, а до нас, к сожалению, дошла лишь малая толика данных, опубликованных в его монографии¹⁸ и сохранившемся автореферате¹⁹ докторской диссертации. После А.А. Малышева в РФ попытки оценки энергетических материальных констант разрушения асфальтобетона, конечно же, предпринимались. Эти работы, как правило, фокусировались на ограниченном числе типов асфальтобетона и носили разрозненный характер, что затрудняет формирование единой картины в данной области. В отличие от этого, за рубежом в направлении определения энергетических констант хрупкого и квазихрупкого разрушения асфальтобетона активно работают как отдельные научные группы, так и целые научные школы университетов, разрабатывающие передовые методы и модели для определения энергетических констант. В последнее время российские специалисты публикуют работы по исследованиям усталостного разрушения методами четырехточечного изгиба или испытанию дисковых образцов непрямым растяжением [27, 28]. Эти работы вносят ценный вклад в понимание поведения дорожных материалов, но они не фокусируются на энергетических константах разрушения.

¹⁸ Малышев А.А. Прогнозирование остаточного прочностного ресурса дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями: монография. Омск: СибАДИ, 2004. 188 с

¹⁹ Малышев А.А. Теоретические основы и методы прогнозирования и увеличения прочностного ресурса дорожных одежд: авторф. ... д-ра техн. наук. Омск: ПЦ издательства СибАДИ. 2001. 38 с.

* Single Edge Notched Beam (SENB)

** Disk-shaped Compact Tension (DC-T)

*** Semicircular Bend (SCB)

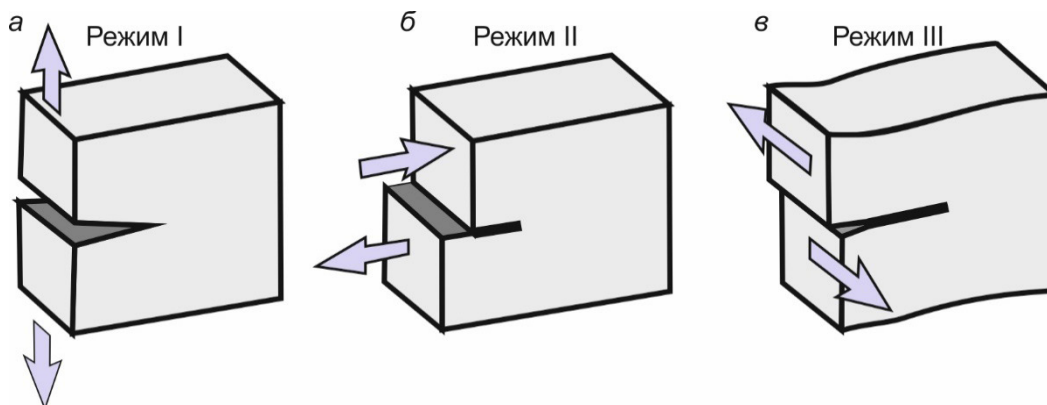


Рисунок 1 – Режимы действия нагрузок (рисунок воспроизведен авторами, но представляет собой широко известную в механике квазихрупкого разрушения иллюстрацию режимов действия нагрузок и классификации трещин):
 а – режим I, или режим раскрытия, при котором поверхности трещины раскрываются без скольжения;
 б – режим II, или режим плоскостного скольжения, при котором поверхности трещины скользят относительно друг друга в направлении, нормальном к фронту трещины;
 в – режим III, или режим разрыва, при котором поверхности трещины скользят относительно друг друга параллельно фронту трещины
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Load modes:
 a – the 1-st mode, or opening mode, in which the crack surfaces open without sliding;
 b – the 2-nd mode, or planar sliding mode, in which the crack surfaces slide relatively to each other in a direction normal to the crack front;
 c – the 3-d mode, or rupture mode, in which the crack surfaces slide relatively to each other in parallel to the crack front
 Source: compiled by the authors.

В самых простых опытах применяется три типа образцов: балка с одним краевым надрезом*, дисковый образец для испытаний на растяжение с компактной геометрией** и полукруглый образец для испытаний на изгиб***. Испытания образцов, как правило, проводят в одном из трех режимов действия нагрузки (режим I, режим II и режим III), они приведены на рисунке 1.

Большинство испытаний асфальтобетонных образцов выполнено при первом режиме действия нагрузки, при котором она приложена перпендикулярно плоскости трещины и

растягивает ее края друг от друга (рисунок 1, а). Но в последние годы были изучены и другие механизмы роста трещин, включая смешанные режимы I/II и I/III. При втором режиме (поперечный сдвиг) нагрузка действует перпендикулярно направлению распространения трещины, вызывая скольжение поперек края трещины. При третьем режиме (продольный сдвиг) нагрузка действует параллельно направлению распространения трещины, вызывая скольжение вдоль края трещины.

На рисунке 2 приведена иллюстрация схем испытания образцов балок с одним разрезом.

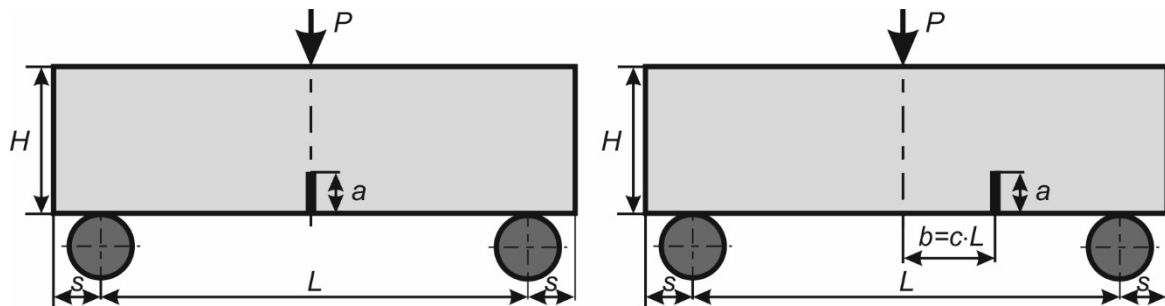


Рисунок 2 – Испытания балки с одним краевым надрезом (иллюстрация сделана авторами, но она широко известна, например, в работе²⁰ можно найти ее аналоги)

Figure 2 – Single-Edge Notched Beam Testing (compiled by the authors, but it is widely known and has analogues²¹).

Рассматривая преимущества применения основ механики хрупкого и квазихрупкого разрушения, приведем результаты некоторых исследований. В работе [29] поставлены эксперименты по типу SENB с надрезом в образце посередине пролета. Особенностью эксперимента являлось изготовление образцов с одним зерновым составом, из которых взяли три образца с разным распределением заполнителя. Благодаря этому в стяжке (целая часть образца, расположенная непосредственно над надрезом) располагались зерна разной крупности и с различным содержанием. Например, в первом образце зерен заполнителя меньше, но фракция больше и т.п. Результаты испытаний всех образцов показали две характерные особенности. Первая – путь трещины проходит либо внутри асфальтовой матрицы (то есть напряжения, и коэффициент интенсивности напряжений преодолевают когезионную прочность битумного вяжущего), либо вдоль границы раздела заполнителя и асфальтовой матрицы (то есть подразумеваются адгезионные силы). Вторая – зерна крупного заполнителя тормозят трещину, она их огибает (то есть проявляется эффект Берга). Как само собой разумеющееся, обработка результатов испытаний позволила определить энергетические константы асфальтобетона (энергию разрушения). Однако самый важный результат был получен при последующем численном моделировании, выполненном при помощи метода

дискретных элементов. Авторы описали путь, пройденный трещиной с учетом когезионной и адгезионной прочности, а также эффекта Берга о торможении трещины крупными зёрнами прочного заполнителя. Безусловно, понятия когезионной и адгезионной прочности, эффекта Берга нам известны, но моделирование на микроуровне позволяет количественно описывать эти параметры, на макроуровне мы можем учесть только косвенно в величине прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона, но пояснить механизм разрушения сможем только словами. Микроуровень дает возможность количественной оценки.

Влияние прочности заполнителя на энергию разрушения асфальтобетонов исследовалось в работах: M.R.M. Aliha [30], A.F. Braham²¹, W.G. Buttlar²² и других специалистов при разных формах образца, как правило, DC-T и SCB тестах. Тесты выполнялись при отрицательных температурах (-30, -18 и -6 °C), а в качестве заполнителя использовались гранитный и известняковый щебень. В ряде экспериментов все остальные свойства (тип и содержание вяжущего, содержание воздушных пустот) были одинаковы. В некоторых экспериментах содержание битума в смесях на известняковом щебне было выше, например, 6,9% по сравнению с содержанием связующего 6% в смесях на гранитном щебне. Авторы всех исследований заявили, что при самой низкой и промежуточной температуре (-30 и

²⁰ Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG (2009) Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test. *Materials and structures*. 2009; 42(5): 677-689. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9412-8>

²¹ Braham A.F., Buttlar W.G., Marasteanu M.O. Effect of binder type, aggregate, and mixture composition on fracture energy of hot-mix asphalt in cold climates. *Transportation Research Record*. 2007; 2001(1): 102–109. <https://doi.org/10.3141/2001-12>

²² Buttlar W.G., et al. Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics. *Transportation Research Record*. 1999; 1681(1): 157–169.

-18 °С) гранитные смеси показали более высокую энергию разрушения. Большинство исследователей указали, что при всех трех отрицательных температурах энергия разрушения гранитных смесей была больше, чем известняковых. Тем не менее в опытах, поставленных А.Ф. Браһат, при самой высокой температуре испытаний (то есть при -6 °С) энергия разрушения известняковых оказалась больше, чем у асфальтобетонных смесей на гранитном щебне. Это было объяснено тем, что при более высокой температуре, при которой трещина распространялась вокруг заполнителей как в гранитной, так и в известняковой смеси, когезионная прочность и морфология известняковых смесей обеспечивали более высокую прочность на излом. Также установлено, что во всех испытаниях трещина огибала гранитный заполнитель. Это же происходило в асфальтобетонных образцах на известняке при температурах -30 и -18 °С. При самой высокой температуре -6 °С эксперименты разных авторов показали отличающиеся результаты. В одних экспериментах трещина огибала щебень, а в других опытах могла проходить как, огибая зерно известняка, так и сквозь него.

Подытоживая экспериментальные данные и обобщая их, отметим, что более прочный заполнитель (гранит) обеспечивает более высокую энергию разрушения, особенно при низких температурах, когда материал становится более хрупким. При повышении температуры пластичность битумного вяжущего возрастает, что может изменять механизм разрушения и приводить к тому, что менее прочный, но лучше сцепленный с битумом заполнитель (известняк в данном случае, при определенных условиях) может демонстрировать лучшую трещиностойкость.

Авторы работы [31] провели SCB-тесты, исследовав влияние гранулометрического состава заполнителей на устойчивость асфальтобетонных смесей к разрушению. В этом исследовании использовались пять различных гранулометрических составов заполнителей. Наибольший размер частиц заполнителя для этих гранулометрических составов составлял 37,5 мм (состав № 1), 19 мм (состав № 2), 12,5 мм (состав № 3), 9 мм (состав № 4) и 4,75 мм (состав № 5). Схема испытаний и зерновые составы приведены на рисунке 3.

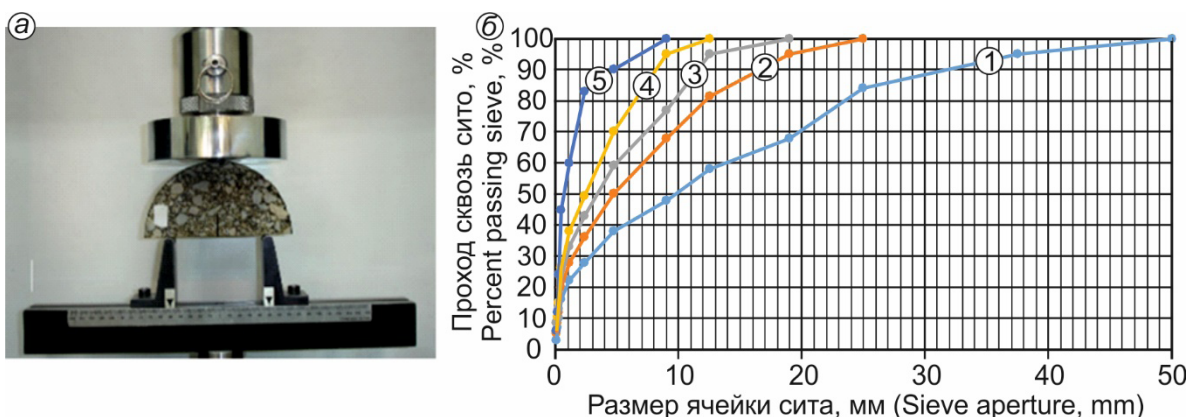


Рисунок 3 – Иллюстрация испытания и зерновые составы смесей: а – схема испытания; б – зерновой состав; 1–5 – номера составов и соответствующая им градация заполнителя (фото на рисунке 3, а заимствовано из работы [30], рисунок 3, б сделан авторами по табличным данным работы [30])

Figure 3. Illustration of the test and grain compositions of mixtures: а – the test scheme; б – the grain composition; 1-5 – the composition numbers and the corresponding to the numbers the gradation of the filler Source: Fig. 3 (a) is taken from [30], Fig. 3 (b) compiled by the authors in accordance with the tabular data [30].

Все смеси, за исключением состава № 1, приготавливали с одинаковым содержанием воздушных пустот (4%), одним и тем же типом битумного вяжущего и его маркой по вязкости. Содержание воздушных пустот в смеси состава № 1 составляло 8,5%. Это связано с тем, что дальнейшее уплотнение смеси до достижения содержания воздушных пустот на уровне 4%, то есть при более плотном уплотнении, привело бы к разрушению крупных заполнителей в горячей смеси. Единственным исследуемым параметром была градация заполнителя. Температура испытаний образцов была отрицательной и для всех образцов составляла -10°C . При испытании в режиме действия нагрузки I наихудший результат по предельной величине КИН (K_{Ic}) показала смесь состава № 1. Причина объясняется высоким содержанием воздушных пустот, являющихся концентраторами напряжения. Высокое содержание воздушных пустот в этом составе связано с малым количеством мелкого заполнителя, который должен располагаться в межзерновом пространстве более крупных фракций. Наибольшее предельное значение КИН (K_{Ic}) показала смесь состава № 4, чуть меньшие значения K_{Ic} продемонстрировали смеси составов № 2 и 3. Предельное значение КИН (K_{Ic}) у смеси состава № 5 оказалось больше, чем продемонстрировала смесь состава 1, но меньше параметров, установленных для трех других составов. Испытания в режиме действия нагрузки II и смешанном типе действия нагрузки I/II также подтвердили наилучшую трещиностойкость смеси состава 4, а наихудшие результаты получены для смесей составов № 1 и 5. По мнению авторов работы [31], преимуществом смеси состава № 4 перед составом № 5 является наличие более крупного заполнителя: в составе № 4 наибольший размер заполнителя 9 мм (то есть смесь щебеночная), а в составе № 5 – 4,75 мм (песчаная смесь). В подтверждение этого преимущества авторы работы [31] цитируют работу D.W. Christensen²³, в которой установлено, что при использовании щебня устойчивость к образованию колеи повышалась за счет увеличения внутреннего трения смеси. Также авторы работы [31] указывают на доклад B. Birgisson²⁴ и сообщают, что смеси, содер-

жащие мелкозернистые заполнители, имели более низкую прочность из-за склонности к образованию микротрещин.

Авторы работы [30] провели SCB-тесты с асфальтобетонными образцами с заполнителем разной градации при различных режимах действия нагрузки, чтобы определить вязкость разрушения J_c горячих смесей (J_c – предельное значение J -интеграла, если $J=J_c$, то материал больше не способен сопротивляться распространению трещины и разрушается). Оказалось, что вязкость разрушения снижается по мере уменьшения размера заполнителей. Смеси, содержащие более мелкие заполнители, продемонстрировали более низкую прочность на излом при нагрузке на сдвиг (режим II) по сравнению с нагрузкой на растяжение (режим I). Следовательно, более крупные заполнители более эффективны для повышения прочности на излом смесей, подвергающихся нагрузкам на сдвиг.

Авторы публикации [31] сообщают, что с повышением содержания воздушных пустот предельные значения КИН уменьшаются, что характерно для всех SCB-тестов, выполненных при режимах действия нагрузки I, II и комбинации I/II. Испытания выполнены при отрицательной температуре (-10°C), а образцы из горячей асфальтобетонной смеси были приготовлены с разным содержанием воздушных пустот: 4, 7 и 10%. Аналогичные результаты были получены в работе [30], в которой испытание по определению вязкости разрушения образцов горячей асфальтобетонной смеси выполнено при содержании воздушных пустот 3, 5 и 7%. Согласно результатам исследования, вязкость разрушения снижалась по мере увеличения содержания воздушных пустот в смеси. Эффект увеличения энергетических констант асфальтобетонных смесей при уменьшении СВП объясняется двумя причинами. Во-первых, меньшее СВП обуславливает более высокую плотность, а для роста трещины в плотной смеси требуется больше энергии нагрузки и деформации. Во-вторых, воздушные пустоты в смеси являются концентраторами напряжений, а значит, они могут ускорять развитие трещин при низких температурах. По данным авторов работ [32, 33], смеси с содержанием воздуха 4% обладали более высокой

²³ Christensen D.W., et al. Indirect tension strength as a simple performance test, performance tests for asphalt mixes. Transportation Research Circular, number E-C068, Washington, 2004; 44–57

²⁴ Birgisson B. et al. Evaluation of aggregate size-dependent of asphalt mixtures in cracking behavior. In: 3rd international SIIV congress, Bari, Italy, 2005; 22–24

энергией разрушения, чем смеси с содержанием воздуха 7%, как и ожидалось. Авторский коллектив работы [34] сообщил, что наличие воздушных пустот снижает общую прочность смеси, но при этом может оказывать комплексное влияние на поведение зоны разрушения, поскольку воздушные пустоты могут смягчать острый край трещины [34]. Итогом исследований работ [30, 31, 32, 33, 34] является то, что при увеличении содержания воздушных пустот энергия разрушения уменьшается. Здесь авторы настоящей публикации проведут параллель с формулой (18), в которой множитель (1-СВП) относится к модулю упругости, уменьшая его значение по мере увеличения СВП. При этом уменьшение модуля упругости приводит к уменьшению критической длины трещины.

Энергия разрушения G_f определяется как количество энергии, необходимое для распространения трещины на единицу площади, и записывается следующим образом:

$$G_f = W_f / A_{lig}, \quad (19)$$

где W_f и A_{lig} – обозначают работу разрушения (Дж) и площадь сечения образца, которая не затронута повреждением (или площадь связи) (m^2) соответственно.

Из анализа формулы (19) несложно заметить, что энергия разрушения G_f выражается в Дж/м². Отсюда следует, что единицы измерения Дж/м² для энергии разрушения (G_f) напрямую указывают на то, что это энергия, приходящаяся на единицу площади. Эта полностью соответствует определению удельной поверхностной энергии. Формула Гриффитса для критического размера трещины (4) использует именно данный параметр, который представляет собой энергию, необходимую для создания новой поверхности в результате роста трещины. Таким образом, энергия разрушения (G_f) является количественным выражением удельной поверхностной энергии в контексте механики разрушения. Поэтому уменьшение энергии разрушения, то есть аналога поверхностной энергии А. Гриффитса, также как и уменьшение модуля упругости, приводит к уменьшению критической длины трещины.

В исследованиях специалистов дорожной отрасли изучалось влияние содержания вяжущего, а также показателей его свойств и модифицирующих добавок на энергетические константы асфальтобетона. В. Mobasher с коллегами²⁵ провел серию SENB-тестов с асфальтобетонами при отрицательной температуре (–1 и –7 °С). Содержание битумного вяжущего в образцах составляло 4, 5 и 6%. Наиболее высокие значения вязкости разрушения при обеих температурах испытаний показали образцы с содержанием вяжущего 5%. В ранее цитируемой нами работе А.Ф. Braham, W.G. Buttlar и М.О. Marasteanu получены результаты испытания асфальтобетонных образцов при отрицательных температурах (то есть –30, –18 и –6 °С) с одним и тем же типом вяжущего, СВП, зерновым составом, типом заполнителя, но при разном содержании битумного вяжущего. В одних образцах применено оптимальное количество вяжущего, установленное методом объемно-функционального проектирования Superpave, а в других образцах содержание связующего было увеличено на 0,5%. Согласно результатам, при низких и средних температурах добавление связующего вещества не влияло на энергию разрушения из-за образования хрупкой матрицы при низких температурах, в то время как при высоких температурах добавление 0,5% битумного вяжущего значительно увеличивало энергию разрушения, поскольку связующее вещество может рассеивать большое количество энергии. Значит, увеличение содержания битумного вяжущего не обязательно улучшит энергетические константы асфальтобетона при низких температурах, но повысит энергию разрушения при более высоких температурах. Здесь авторы обратят внимание на возможность применения энергетических параметров механики микроуровня для корректировки рецептов составленным путем стандартного проектирования по методу Superpave.

В работе [33] проведено исследование влияния марки битумного вяжущего и модификатора. SBS* на энергию разрушения. Образцы с отрицательной температурой (–30, –18 и –6 °С) испытаны при II режиме действия нагрузки.

²⁵ Mobasher В., Mamlouk М.С., Lin Н.М. Evaluation of crack propagation properties of asphalt mixtures. Journal of Transportation Engineering. 1997; 123 (5): 405–413.

* SBS (стирол-бутадиен-стирол) – это синтетический каучук, который используется в качестве модификатора для битумных вяжущих. Данная добавка улучшает свойства обычного битумного вяжущего, делая его более прочным, эластичным и долговечным. Доказанными преимуществами считают уменьшение (хрупкости при низких температурах), снижение пластичности (при высоких температурах) и повышение устойчивости к старению.

Модификатор SBS способствовал значительному повышению энергии разрушения, вследствие чего его применение с позиций повышения прочности асфальтобетона и, как следствие, продления межремонтных сроков признано эффективным. Особые преимущества применения модификатора SBS были заметны при двух более низких температурах (-30 и -18 °C). В этих условиях энергии разрушения асфальтобетонов на модифицированном битумном вяжущем более чем на 30% превысила аналогичную энергетическую константу смесей на стандартных битумных вяжущих PG58-28 и PG64-28. Испытание образцов из смесей на обычном битумном вяжущем указанных марок дало ожидаемые результаты. В условиях отрицательных температур асфальтобетоны, содержащие вяжущее PG58-28, показали более высокую энергию разрушения, чем образцы на битумном вяжущем марки PG64-28. Более высокая устойчивость к разрушению асфальтобетонной смеси, в составе которой применено вяжущее PG58-28, объясняется тем, что оно мягче, а битумное вяжущее PG64-28, наоборот, жестче. Аналогичную цель преследовали авторы работы [31], они для приготовления асфальтобетонных образцов применяли четыре вида вяжущих. Первые три – являлись битумами с показателями пенетрации 40, 60 и 85, а четвертым связующим веществом являлся битум с показателем пенетрации 85, но модифицированный добавкой SBS в количестве 3,5% по массе. Содержание битума во всех образцах было 4%, содержание воздушных пустот 4% (выше указано, что при содержании воздушных пустот энергетическая константа асфальтобетона имела наибольшее значение). То есть в этих опытах авторы работы [31] продолжили подбор состава, подбирая марку битума по вязкости и оценивая целесообразность добавки модификатора SBS. Эксперименты проводились при температуре -10 °C. Результатом опытов было определение предельной величины КИН при I и II режимах действия нагрузки, а также смешанном режиме I/II. Все без исключения предельные значения КИН возрастали по мере увеличения показателя пенетрации, но наибольший эффект получен применением в смеси модифицированного битума с показателем пенетрации 85 и добавкой SBS в количестве 3,5% по массе. В экспериментах, описанных в работе [30], определяли вязкость разрушения асфальтобетонных образцов, изготовленных с применением битумов с показателями пенетрации 60/70 и

85/100. Результаты опытов подтвердили факт повышения энергетической константы при применении более мягкого (менее вязкого) битума, то есть марки 85/100. Наибольший эффект от применения этого битума проявился в испытаниях с применением второго режима действия нагрузки. При испытаниях с применением I режима действия нагрузки, указанный эффект тоже отмечен, но он проявился в меньшей степени.

Большинство работ в области экспериментальной микромеханики асфальтобетона посвящено исследованию влияния отрицательных температур на два важных показателя: энергию разрушения и вязкость разрушения. Общей закономерностью такого влияния является, что при понижении температуры испытаний до интервала -15 °C... -20 °C энергетические константы асфальтобетона увеличивались, но при дальнейшем понижении температуры энергия и вязкость разрушения уменьшались. Это объясняется повышением хрупкости. Причем такая зависимость энергетических параметров горячих асфальтобетонов от температуры испытаний характерна для разных типов испытаний SENB-тест, DC(T)-тест и SCB-тест и разных режимов действия нагрузки I, II, I/II. Нужно заметить, что закономерности влияния температуры горячего асфальтобетона на его энергию и вязкость разрушения установлены в 90-х годах прошлого века. Но такие исследования востребованы и в настоящее время. Эксперименты выполняются на образцах из теплых смесей, щебеночно-мастичных смесях на модифицированных битумных вяжущих, дисперсно-армированных асфальтобетонах или на действие перепада температуры, а также на образцах с двойным надрезом, сделанных в нижней и верхних частях балки [35, 36, 37, 38].

Наш обзор позволяет сделать выводы о влиянии на энергетические константы асфальтобетона показателей его физических свойств, содержание в смеси различных компонентов, в том числе модификаторов и армирующих элементов (фибры, волокон). В своем обзоре мы ограничены необходимостью максимально кратко изложения, но понятного большому кругу читателей. Поэтому отметим, что в этом обзоре приведены результаты далеко не всех исследований, а также факторов, влияющих на энергию и вязкость разрушения асфальтобетона. В настоящее время изучено влияние на энергетические константы асфальтобетона, добавляемых наноматериалов, таких как нанодиоксид кремния и нанотитан, нанооксид

цинка, наноглина, углеродные нановолокна, комбинаций нано частиц и полимеров (наночастицы ZnO, TiO₂, CaCO₃ стирол-бутадиен-стирол (SBS) и стирол-бутадиен-каучук SBS) [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46].

Выполняя анализ материалов научных публикаций, мы пришли к выводу, что энергию разрушения (G_f) и тождественную ей удельную поверхностную энергию (γ) можно принять в пределах:

- для асфальтобетона в эксплуатируемом покрытии с ухудшенной адгезией (например, из-за присутствия влаги, старения битума или усталости) значения обычно находятся в пределах 20–50 Дж/м²;

- для асфальтобетона на битумном вяжущем без добавок модификаторов с хорошей адгезией и без признаков старения и усталости значения могут находиться в диапазоне от 50 до 200 Дж/м²;

- для асфальтобетона с более прочным битумным вяжущим или лучшей адгезией, то есть на битумном вяжущем улучшенном модификаторами значения могут достигать 200–400 Дж/м² и выше.

Анализируя представленные нами значения удельной поверхностной энергии (энергии разрушения) асфальтобетона, можно заметить, что они более чем на порядок, а то и два порядка превосходят аналогичную характеристику для металлов, которую принято принимать равной 1–2 Дж/м² для железа, 1,5 Дж/м² для алюминия. Из такой разницы следует, что если бы модули упругости асфальтобетона и металла были бы равны, то для одинакового напряжения критическая длина трещины в асфальтобетоне была бы больше, чем в металле. Но модули упругости этих материалов различны. Так, наибольшим модулем упругости обладает асфальтобетон на битуме БНД 50/70, применяемый для устройства покрытия, его величина при температуре 0 °С составляет 7200 МПа или 7,2 ГПа. Модуль упругости углеродистых сталей составляет значения 200...210 ГПа. То есть модуль упругости наименее деформируемого асфальтобетона практически в 30 раз меньше модуля упругости стали. Кроме того, разница энергии разрушения различных материалов объясняется природой материала и механизмом их разрушения. Металлы имеют кристаллическую структуру с прочными ковалентными или металлическими связями между атомами, а их разрушение протекает в основном за счет пластической деформации (движение дислокаций) и последующего трещинообразования

и распространения по кристаллической решетке. Поверхностная энергия металла связана с энергией, необходимой для создания новой поверхности путем разрыва этих прочных межатомных связей. Асфальтобетон представляет собой композитный материал, состоящий из минеральных заполнителей (щебень, песок, минеральный порошок) и битумного вяжущего. Это неоднородная, сложная система. Разрушение асфальтобетона происходит гораздо более комплексно и включает в себя несколько механизмов: адгезионное и когезионное разрушение, разрушение минеральных частиц (оно, как правило, происходит при более высоких нагрузках).

Формула Гриффитса, которую мы используем, описывает критическое напряжение для хрупкого разрушения, где поверхностная энергия играет ключевую роль. В контексте асфальтобетона эта «поверхностная энергия» является скорее энергией разрушения или энергией образования новой поверхности в сложной композитной системе. Эта энергия включает в себя две основные составляющие: энергию адгезии и энергию когезии. В асфальтобетоне адгезия между битумом и минеральными частицами является критически важным фактором, определяющим его прочность и долговечность. Хорошая адгезия означает сильные силы притяжения между битумом и минералами. При распространении трещины в асфальтобетоне эта трещина часто идет по границе раздела битум-минерал. Чтобы создать новую поверхность, необходимо разорвать эти адгезионные связи. Энергия, затрачиваемая на разрыв данных связей, может быть весьма значительной, особенно если учесть полярные группы в битуме и на поверхности минералов, которые образуют прочные химические или физические связи. Битум обладает когезионной прочностью и сам по себе является сложным полимером с определенной внутренней структурой и силами межмолекулярного взаимодействия. При разрушении асфальтобетона трещина может также проходить через сам битум, разрывая его внутренние связи. Энергия, необходимая для этого, также вносит вклад в общую энергию разрушения. Битум является вязко-упругим материалом, это означает, что его поведение зависит от скорости нагружения и температуры. При высоких скоростях нагружения (что часто происходит при образовании трещин) битум может проявлять более хрупкое поведение, и его разрушение требует значительной энергии. В случае асфальтобетона, несмотря

на низкий модуль упругости (что означает, что он легко деформируется), силы адгезии между битумом и минералами могут быть очень сильными. Именно эти сильные адгезионные связи, а также когезия битума и сложная структура, требуют значительной энергии для создания новой поверхности при разрушении, что и приводит к высоким значениям «поверхностной энергии» в формуле Гриффитса.

Теперь скажем, что, определив диапазон варьирования удельной поверхностной энергии, можно выполнить расчет критических размеров дефекта. Это целесообразно сделать для двух значений параметра γ , соответственно равных 50 и 200 Дж/м². В качестве напряжения, вызывающего разрушение на макроуровне, примем прочность на растяжение при изгибе $R_{\text{ри}}$ при температуре асфальтобетона 0 °С, и соответствующий этой температуре эталонный модуль упругости E_{max} , то есть модуль абсолютно плотного асфальтобетона. Здесь акцентируем внимание специалистов,

что целью является ориентировочный расчет критических размеров дефектов в структуре. Поэтому авторы не рассчитывают температурные напряжения в покрытии, приводящие к возникновению температурных трещин, и напряжения растяжения в асфальтобетоне над трещиной, приводящие к возникновению отраженной трещины, а условно принимают в качестве напряжения макроскопическую прочность материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оговорив все входные условия для расчета, необходимо привести данные работы [13] о величине модуля упругости эталонного асфальтобетона и модуля упругости при различном содержании воздушных пустот. Также необходимо привести значения прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе, регламентируемые ГОСТ Р 71404. Эти данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Эталонные модули упругости асфальтобетонов [13] и прочность на растяжение от изгиба
Источник: составлена авторами на основе данных работы [13] и ГОСТ Р 71404.

Table 1

Reference elastic moduli of asphalt concretes calculated by R. Murtazin and tensile strength from bending
Source: compiled by the authors based on the data from [13] and GOST R 71404.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	Модуль упругости эталонного асфальтобетона (E_{max}), МПа, (при температуре 0 °С)	Прочность эталонного асфальтобетона (R_0), МПа, (при температуре 0 °С)
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для покрытий	БНД 130/200	3802	9,0
	БНД 100/130	5417	9,3
	БНД 70/100	6667	9,5
	БНД 50/70	7500	9,8
Асфальтобетоны (ГОСТ Р 58406.2) на битумах (ГОСТ 33133) для оснований	БНД 130/200	3316	8,0
	БНД 100/130	4684	8,5
	БНД 70/100	5737	9,0
	БНД 50/70	6421	9,5

В таблице 2 представлены результаты расчетов критического размера дефекта структуры асфальтобетонов для температуры 0 °С и удельной поверхностной энергией 50 Дж/м²

(обычный горячий асфальтобетон на битумах БНД) и 200 Дж/м² (горячий асфальтобетон на битумах БНД с добавкой модификатора).

Таблица 2
Критическая длина трещины в горячем асфальтобетоне (данные авторов)
Источник: составлено авторами.

Table 2
Critical crack length in hot mix asphalt (authors' data)
Source: compiled by the authors.

Тип асфальтобетона	Вид вяжущего	Критическая длина трещины мм, при температуре асфальтобетона 0 °С и СВП, %							
		0	2	3	4	5	6	7	8
Горячий асфальтобетон на битумах БНД (удельная поверхностная энергия $\gamma=50$ Дж/м ²)									
Асфальтобетоны для покрытий на битумах марок БНД:	130/200	1,495	1,465	1,450	1,435	1,420	1,405	1,390	–
	100/130	1,995	1,955	1,935	1,915	1,895	1,875	1,855	–
	70/100	2,353	2,305	2,283	2,258	2,235	2,213	2,188	–
	50/70	2,488	2,438	2,413	2,388	2,363	2,338	2,313	–
Асфальтобетоны для оснований на битумах марок БНД:	130/200	1,463	–	1,418	1,403	1,388	1,375	1,360	1,345
	100/130	1,928	–	1,868	1,850	1,830	1,810	1,793	1,773
	70/100	2,255	–	2,188	2,165	2,143	2,120	2,098	2,075
	50/70	2,365	–	2,293	2,270	2,245	2,223	2,200	2,175
Горячий асфальтобетон на битумах БНД с добавкой модификатора ($\gamma=200$ Дж/м ²)									
Асфальтобетоны для покрытий на битумах марок БНД:	130/200	5,98	5,86	5,8	5,74	5,68	5,62	5,56	–
	100/130	7,98	7,82	7,74	7,66	7,58	7,5	7,42	–
	70/100	9,41	9,22	9,13	9,03	8,94	8,85	8,75	–
	50/70	9,95	9,75	9,65	9,55	9,45	9,35	9,25	–
Асфальтобетоны для оснований на битумах марок БНД:	130/200	5,85	–	5,67	5,61	5,55	5,5	5,44	5,38
	100/130	7,71	–	7,47	7,4	7,32	7,24	7,17	7,09
	70/100	9,02	–	8,75	8,66	8,57	8,48	8,39	8,3
	50/70	9,46	–	9,17	9,08	8,98	8,89	8,8	8,7

Примечание: красным шрифтом – выделены расчетные значения, полученные для эталонного асфальтобетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя данные таблицы 2, нужно отметить, что в горячих асфальтобетонах на модифицированном битуме марок БНД возникновение температурных трещин при нулевой температуре материала невозможно. Во-первых, размеры воздушных пустот, содержащихся в структуре реальных асфальтобетонов, меньше критических размеров дефектов, представленных в таблице 2. Во-вторых, при расчете критического размера трещины мы исходили из предположения о равенстве температурного напряжения, возникающего в асфальтобетоне, его пределу прочности на растяжение при изгибе. В действительности при температуре 0°C величина температурных напряжений, возникающих в асфальтобетоне, меньше значений прочности, представленных в таблице 2. Ориентировочная теоретическая величина таких напряжений при температуре 0°C не превышает 4,0 МПа. Здесь отметим, что теоретическая величина температурного напряжения меньше фактического значения, потому что ее рассчитывают при полном ограничении деформации подстилающего основания. В реальных условиях несущие и дополнительные слои основания дорожной одежды не являются абсолютно жесткими, а напряжение в асфальтобетоне релаксирует. Поэтому фактические температурные напряжения будут ниже теоретических значений [47, 48, 49].

Выполняя анализ критических размеров дефектов структуры асфальтобетона на обычных битумах марок БНД, отметим, что их величина соответствует наибольшим фактическим размерам воздушных пустот в структуре асфальтобетона при его качественном уплотнении (мелкие пустоты обычно 1–3 мм). Тем не менее, как нами сказано, теоретические значения температурных напряжений, возникающих в асфальтобетоне, в два и более раза меньше его прочности, заложенной нами в расчет. Поэтому при температуре 0°C и такие асфальтобетоны работают без образования температурных трещин.

Рассматривая величину теоретических напряжений в асфальтобетоне при отрицательных температурах, отметим, что значение такого напряжения возрастает с понижением температуры, достигая значений в 8 МПа при температуре минус 30°C . И, как показывают данные расчетов, таких напряжений асфальтобетона уже не выдерживают.

Авторы отмечают, что теория хрупкого разрушения А. Гриффитса не учитывает эффект

«подрастания» трещины в структуре материала. Вследствие этого даже при точнейшем определении всех параметров расчета: удельной поверхностной энергии, модуля упругости, температурных напряжений, возникающих в асфальтобетоне, расчет по Гриффитсу даст ориентировочные представления о количественной оценке опасного состояния. Отсюда вытекает необходимость применения линейно-упругой механики разрушения и нелинейной механики разрушения, параметрами которых являются энергия и вязкость разрушения. Поэтому нашу работу необходимо продолжить в направлении применения к расчету асфальтобетонных слоев теории квазихрупкого разрушения Ирвина и теории роста трещин Черепанова – Райса.

Помимо применения энергетических концепций механики хрупкого и квазихрупкого разрушения в расчетах дорожных одежд их можно использовать в области материаловедения, создавая новую методологию подбора составов асфальтобетона. Такая методология может дополнять методы объемно-функционального проектирования состава асфальтобетона. Это предложение авторов связано с тем, что проектирование состава асфальтобетонных смесей по методу «Суперпайв» создано в 90-х годах прошлого столетия, оно только в нашей стране позиционируется как новейший метод. За рубежом данная технология применяется, но есть понимание многих ее недостатков. Поэтому параллельно технологии «Суперпайв» и другим методам подбора состава смеси, основанным на оценке параметров асфальтобетона на макроуровне, создано большое количество экспериментальных методик определения энергетических констант этого материала. Как они работают, показано в разделе «Материалы и методы». В этом разделе нами приведен пример уточнения оптимального содержания битумного вяжущего в смеси, установленного по технологии «Суперпайв», с последующей оценкой энергетических параметров асфальтобетонных образцов на микроуровне. По нашему мнению, такое уточнение крайне важно, ведь содержание битумного вяжущего – это один из основных параметров, влияющих на долговечность покрытия.

Задачами дальнейших исследований может стать:

1. Экспериментальное определение параметров разрушения. Для применения ЛУМР и НЛМР необходимо экспериментально определять параметры, такие как энергия разру-

шения (G) и вязкость разрушения J_c и трещиностойкость (K_{IC} , K_{IIC} и K_{IIIC}). Эти параметры характеризуют сопротивление материала распространению трещин и позволяют более точно прогнозировать его поведение.

2. Моделирование с учетом микроструктуры. Дальнейшие исследования должны учитывать микроструктуру асфальтобетона, включая размеры и распределение воздушных пустот, а также свойства битумного вяжущего и минерального заполнителя. Это позволит создать более реалистичные модели, учитывающие влияние микроструктуры на трещиностойкость.

3. Исследование влияния скорости нагружения. Температурные напряжения возникают постепенно, но скорость их нарастания может влиять на процесс разрушения. Необходимо исследовать влияние скорости нагружения на трещиностойкость асфальтобетона при различных температурах.

4. Разработка критериев разрушения на основе механики разрушения. На основе результатов экспериментальных исследований и численного моделирования необходимо разработать критерии разрушения, учитывающие как упругие, так и пластические свойства материала, а также влияние микроструктуры и скорости нагружения. Эти критерии позволят более точно прогнозировать образование трещин в асфальтобетонных покрытиях и разрабатывать более долговечные материалы.

5. Численное моделирование. Использование методов конечных элементов (МКЭ) или дискретных элементов (МДЭ) для моделирования поведения асфальтобетона с учетом микроструктуры и параметров разрушения позволит получить более детальную картину напряженно-деформированного состояния и прогнозировать образование трещин.

Кроме того, авторы хотят привлечь внимание специалистов, в особенности молодых, к направлению определения энергии и вязкости разрушения асфальтобетона и применению этих параметров при подборе составов асфальтобетонных смесей. Связано это с тем, что переход дорожной отрасли России на версии европейских и североамериканских стандартов, переведенных на русский язык, требует от научных сотрудников повторения пути, уже пройденного зарубежными коллегами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горский М.Ю., Кадыров Г.Ф., Стрельцов А.В., Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета жестких дорожных одежд с учетом

применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // *Дороги и мосты*. 2021. Т. 46, № 2. С. 53–74.

2. Радовский Б.С., Мерзликин А.Е. Оценка погрешностей, возникающих при расчете жестких дорожных одежд // *Дороги и мосты*. 2016. Т. 35, № 1. С. 59–69.

3. Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Горский М.Ю., Медведев Д.В., Стрельцов А.В. Актуальные подходы к моделированию напряженно-деформированного состояния жестких дорожных одежд от статических и динамических нагрузок // *Дороги и мосты*. 2025. Т. 53, № 1. С. 55–71. <https://doi.org/10.70991/1815-896X-2025-1-53-55-71>

4. Мерзликин А.Е., Корчажников Я.Н. Продление сроков службы жестких дорожных одежд при проектировании: тривиальные и нетривиальные способы // *Дороги и мосты*. 2018. Т. 39, № 1. С. 105–117.

5. Косенко Н.В., Горячев М.Г. Обоснование кратковременных расчетных модулей упругости асфальтобетонов для проектирования дорожных одежд улично-дорожной сети // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2025. № 2. С. 20–22.

6. Горячев М.Г. Оценка поправочного коэффициента для определения минимального требуемого значения модуля упругости жестких дорожных одежд // *Транспортное строительство*. 2018. № 5. С. 10–12.

7. Ekwulo E.O., Eme D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement // *The International Journal Of Engineering And Science*. 2013. Т. 2. № 8. С. 62–77.

8. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis // *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. Т. 24. № 1. Article No 2268808. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808>

9. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. // *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. Т. 24. No 2. Article № 2270569, <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569>

10. Belhaj M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt // *Infrastructures*. 2025. №. 10. Article № 269. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>

11. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling // *Civil Engineering Journal*. 2025. Т. 11. № 7. Pp. 2765–2781. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08>

12. Aleksandrova N.P., Chysow V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Т. 62. № 2. С. 69–82. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.7>

13. Углова Е.В. Прогнозирование остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий с учетом реальных условий эксплуатации. // Вестник ВолгГАСУ. Серия Строительство и архитектура. 2010. № 17(36). С.43–47.
14. Чусов В.В., Муртазин Р.Х., Александров А.С. Учет влияния содержания воздушных пустот на модуль упругости асфальтобетонов для расчета дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2025. № 22(6). С. 1000–1017. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>.
15. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 698. Article No 077010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010>
16. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шило О.А. Прогнозирование накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях жестких дорожных одежд // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 52–61. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006>
17. Пегин П.А., Капский Д.В., Буртыль Ю.В. Разработка методики оценки продольной ровности при изменении прочности дорожных конструкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 37–47. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47>
18. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности жестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 570–583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>
19. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B., Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings // In book: Transport Infrastructure and Systems. 2017. С. 3–8. <https://doi.org/10.1201/9781315281896-1>
20. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis // Applied Sciences. 2019. Т. 1. Article No 229. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5>
21. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. // Pollack Periodica. 2022. Т. 17. № (3). С 59–64. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00588>
22. Olexa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials // Pollack Periodica. 2016; Т. 11. №3. С. 131–140. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12>
23. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Analysis of the deformation energy dissipation in a layered medium under dynamic loading (on the example of highways) // Soil mechanics and foundation engineering. 2024. Т. 61. № 5. С. 445–451. <https://doi.org/10.1007/s11204-024-09995-3>
24. Тиратурян А.Н., Акулов В.В. Энергия деформирования в слоистой среде при ударном нагружении (на примере автомобильных дорог) // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 4. С. 128–141. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.52.44.011>
25. Tiraturyan A.N. Forecasting of the Residual Life of Pavements on Highways Based on the Analysis of Energy Dissipation under the Dynamic Influence of Transport // Journal of friction and wear. 2023. Т. 4. С. 91–96 <https://doi.org/10.3103/S1068366623020113>
26. Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Ляпин А.А. Исследование распределения энергии динамического воздействия транспортных средств в слоях жесткой дорожной конструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 2. С. 178–194. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.10>
27. Kadyrov G.F., Simchuk Ye.N., Tiraturyan A. N. Comparative testing of asphalt concrete for fatigue life using various modern laboratory methods // Russian journal of building construction and architecture. 2024. Т. 63. № 3. С. 65–75. <https://doi.org/10.36622/2542-0526.2024.63.3.006>
28. Tiraturyan A.N. Modelling of stress-strain state of asphalt concrete layers in pavements taking into account the results of laboratory four-point bending tests // Construction Materials and Products. 2024. Т. 7. № 4. Статья № 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-5>
29. Gao H, Yang X, Zhang C. Experimental and numerical analysis of three-point bending fracture of pre-notched asphalt mixture beam // Construction and Building Materials. 2015. Т. 90. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.047>
30. Aliha M.R.M., et al. Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures // Construction and Building Materials. 2014. Т. 54. С. 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.097>
31. Pirmohammad S., Ayatollahi M. Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading // Cold Regions Science and Technology. 2015. Т. 110. С.149–159. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.001>
32. Li X., et al. Effect of factors affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature // Road Materials and Pavement Design. 2008. Т. 9. № 1. С. 397–416. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690176>
33. Li X., Marasteanu M. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete // Experimental Mechanics. 2010. Т. 50. № 7. С. 867–876. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9303-0>
34. Li X, et al. Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2010. Т. 22. № 2. С. 145–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:2\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(145))
35. Artamendi I., Khalid H.A. A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests

for asphalt // *Road Materials and Pavement Design*. 2006. Т. 7. № 1. С. 163–180. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690063>

36. Mansourian A., Razmi A., Razavi M. Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers // *Construction and Building Materials*. 2016. Т. 117. С. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.128>

37. Pirmohammad S., Abdi M., Ayatollahi M.R. Effect of support type on the fracture toughness and energy of asphalt concrete at different temperature conditions // *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. Т. 254. № 7.: Article No 107921. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107921>

38. Pirmohammad S., Kiani A. Impact of temperature cycling on fracture resistance of asphalt concretes // *Computers and Concrete*. 2016. Т. 17. №4. С. 541–551. <https://doi.org/10.12989/cac.2016.17.4.541>

39. Amin I., et al. Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate // *Construction and Building Materials*. 2016. Т. 121. № 8. С. 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.168>

40. Arabani M., Faramarzi M. Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties // *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 83. № 1. С. 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.035>

41. Ashish P.K., Singh D., Bohm S. Evaluation of rutting, fatigue and moisture damage performance of nanoclay modified asphalt binder // *Construction and Building Materials* 2016. Т. 113. С. 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.057>

42. Kordi. Z, Shafabakhsh G. Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃// *Construction and Building Materials*. 2017. Т. 134. С. 530–539 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.202>

43. Pirmohammad S, Majd-Shokorlou Y, Amani B Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe₂O₃ and carbon nanotubes // *Road Mater Pavement Des* 2019. Т. № 1. С. 1–23. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1608289>

44. Shafabakhsh G., Ani O.J. Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates // *Construction and Building Materials* 2015. Т. 98. С. 692–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.083>

45. Zhang H.L., et al. High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt // *Construction and Building Materials*. 2016. Т. 114. № 1. С. 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.118>

46. Ziari. H, et al. The investigation of the impact of carbon nano tube on bitumen and HMA performance // *Petroleum Science and Technology*. 2014. Т. 32. № 17. С 2102–2108. <https://doi.org/10.1080/10916466.2013.763827>

47. Телтаев Б.Б. Новый взгляд на низкотемпературное трещинообразование в асфальтобетонном покрытии // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия Геологии и Технические наук*. 2016. Т. 419, № 5. С.161–178.

48. Мозговой В.В. Направленное регулирование термовязкоупругих свойств асфальтобетона // *Вестник ХНАДУ*. 2017. Т. 79. С. 89–93.

49. Колесников Г.Н., Гаврилов Т.А. Моделирование условий появления низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2018. Т. 56. С. 57–66.

REFERENCES

1. Gorsky M.Y., et al. Improving the Calculation Methodology of Flexible Road Pavements Using the Application of the Elastic Theory Solution for a Multi-layer Half-Space. *Roads and Bridges*. 2021; 46(2): 53-74. (In Russ.)

2. Radovsky B.S., Merzlikin A.E. Estimation of Errors Occurring in the Calculation of Non-Rigid Road Pavements. *Roads and Bridges*. 2016; 35(1): 59-69. (In Russ.)

3. Simchuk E.N., et al. Actual approaches to modeling the stress-strain state of non-rigid road pavements from static and dynamic loads. *Roads and Bridges*. 2025; 53(1): 55-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.70991/1815-896X-2025-1-53-55-71>

4. Merzlikin A.E., Korchazhnikov Ya.N. Extension of the service life of non-rigid road pavements during design: trivial and non-trivial methods. *Roads and Bridges*. 2018; 39(1): 105-117. (In Russ.)

5. Kosenko N.V., Goryachev M.G. Justification of the loading duration of the street and road network pavements. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2025; 2: 20–22. (In Russ.)

6. Goryachev M.G. Determination of the correction factor for the minimum required modulus of elasticity of flexible pavements. *Science, Technology and Practice Journal Transport construction*. 2018; 5: 10–12. (In Russ.)

7. Ekwulo, E.O., Eme, D.B. Expected traffic, pavement thickness, fatigue and rutting strain relationship for low volume asphalt pavement. *The International Journal Of Engineering And Science*. 2013; 2(8): 62–77.

8. Owais M. Analysing Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Modified Hirsch Models for asphalt dynamic modulus prediction using global sensitivity analysis. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(1): Article No 2268808. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268808>

9. Asadi B., Hajj R., Al-Qadi I.L. Asphalt concrete dynamic modulus prediction: Bayesian neural network approach. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(2): Article No 2270569, <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2270569>

10. Belhaj, M., et al. Evaluating Factors Influencing Dynamic Modulus Prediction: GRA-MLR Compared with Sigmoidal Modelling for Asphalt Mixtures with Re-

claimed Asphalt. *Infrastructures*. 2025; 10: Article No 269. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10100269>

11. Hanandeh S., et al. Prediction the Dynamic Modulus of Hot Asphalt Mix Using Genetic Algorithms and Neural Network Modeling. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(7): Pp. 2765–2781. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-08>

12. Aleksandrova N.P., Chysow V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 62(2): 69-82. <https://doi.org/10.5862/MCE.62.7>

13. Chusov V.V., Murtazin R.Kh., Aleksandrov A.S. The consideration of air void content effect on asphalt concrete elastic modulus in pavement design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(6):1000-1017. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1000-1017>

14. Uglova E.V. Forecasting of the residual resource asphalt concrete coverings with the account real working conditions. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering. Series Construction and Architecture*. 2017; 36(17): 43–47 (in Russ.)

15. Uglova E.V., Tiraturjan A.N., Eganyan G.V. Calibration of the prediction model for fatigue damage accumulation in asphalt courses of flexible pavements for the conditions specific to the Russian Federation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698: Article No 077010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/7/077010>

16. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shilo O.A. Prediction of Failure Fatigue Accumulation in Asphalt Concrete Layers of Flexible Pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019; 55(3): 52–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006>

17. Pegin P.A., Kapski D.V., Burtyl Yu.V. Development of Assessment Methodology for Pavement Longitudinal Evenness When Road Construction Durability Changes. *Bulletin of scientific research results*. 2022; 4: 37–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-37-47>

18. Burtyl Y. V., Kapski D. V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

19. Iskakbayev A.I., Teltayev B.B. Rossi C.O. Deformation and strength of asphalt concrete under static and step loadings. *In book: Transport Infrastructure and Systems*. 2017; 3-8. <https://doi.org/10.1201/9781315281896-1>

20. Elnashar G., Bhat R.B., Sedaghati R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. *Applied Sciences*. 2019; 1: Article No 229. doi.org/10.1007/s42452-019-0238-5

21. Fahad M., Nagy R. Fatigue damage analysis of pavements under autonomous truck tire passes. *Pollack Periodica*. 2022; 17(3): 59–64. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00588>

22. Olexa T., Mandula J. Comparison of complex modulus and elasticity modulus of bitumen bonded materials. *Pollack Periodica*. 2016; T. 11. №3. C. 131–140. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.12>

23. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Analysis of the deformation energy dissipation in a layered medium under dynamic loading (on the example of highways). *Soil mechanics and foundation engineering*. 2024; 61(5): 445–451. <https://doi.org/10.1007/s11204-024-09995-3>

24. Tiraturyan A.N., Akulov V.V. Deformation energy in a layered half-space under impact loading (on the example of highways). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024; 14(4): 128-141. (in Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.52.44.011>

25. Tiraturyan A.N. Forecasting of the Residual Life of Pavements on Highways Based on the Analysis of Energy Dissipation under the Dynamic Influence of Transport. // *Journal of friction and wear*. 2023. T. 4. C. 91–96 <https://doi.org/10.3103/S10683366623020113>

26. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017; No. 2: 178-194. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.2.10>

27. Kadyrov G.F., Simchuk Ye.N., Tiraturyan A. N. Comparative testing of asphalt concrete for fatigue life using various modern laboratory methods. *Russian journal of building construction and architecture*. 2024; 63(3): 65–75. <https://doi.org/10.36622/2542-0526.2024.63.3.006>

28. Tiraturyan A.N. Modelling of stress-strain state of asphalt concrete layers in pavements taking into account the results of laboratory four-point bending tests. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(4). Article No 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-5>

29. Gao H, Yang X, Zhang C. Experimental and numerical analysis of three-point bending fracture of pre-notched asphalt mixture beam. *Construction and Building Materials*. 2015. T. 90. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.047>

30. Aliha M.R.M., et al. Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2014; 54: 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.097>

31. Pirmohammad S., Ayatollahi M. Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; 110: 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.001>

32. Li X., et al. Effect of factors affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*. 2008; 9(1): 397–416. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690176>

33. Li X., Marasteanu M. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture re-

sistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*. 2010; 50.(7): 867–87.6 <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9303-0>

34. Li X, et al. Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2010; 22(2). 145–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:2\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(145))

35. Artamendi I., Khalid H.A. A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. 2006; 7(1): 163–180. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690063>

36. Mansourian A., Razmi A., Razavi M. Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. *Construction and Building Materials*. 2016; 117: 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.128>

37. Pirmohammad S., Abdi M., Ayatollahi M.R. Effect of support type on the fracture toughness and energy of asphalt concrete at different temperature conditions. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021; 254(7): Article No 107921. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107921>

38. Pirmohammad S., Kiani A. Impact of temperature cycling on fracture resistance of asphalt concretes. *Computers and Concrete*. 2016; 17(4): 541–551. <https://doi.org/10.12989/cac.2016.17.4.541>

39. Amin I., et al. Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate. *Construction and Building Materials*. 2016; 121(8): 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.168>

40. Arabani M., Faramarzi M. Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2015; 83(1): 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.035>

41. Ashish P.K., Singh D., Bohm S. Evaluation of rutting, fatigue and moisture damage performance of nanoclay modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2016; 113: 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.057>

42. Kordi Z., Shafabakhsh G. Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. *Construction and Building Materials*. 2017; 134: 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.202>

43. Pirmohammad S., Majd-Shokorlou Y., Amani B. Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe₂O₃ and carbon nanotubes. *Road Mater Pavement Des*. 2019; 21(1):1-23. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1608289>

44. Shafabakhsh G., Ani O.J. Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 2015; 98: 692-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.083>

45. Zhang H.L., et al. High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*. 2016; 114(1): 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.118>

46. Ziari. H, et al. The investigation of the impact of carbon nano tube on bitumen and HMA performance. *Petroleum Science and Technology*. 2014; 32(17): 2102–2108. <https://doi.org/10.1080/10916466.2013.763827>

47. Teltayev B.B. Fresh approach to low temperature cracking in asphalt concrete pavement News of the National Academy of Sciences of the Republic Kazakhstan. Series of Geology and Technical sciences. 2016; 419(5): 161–178. (In Russ.)

48. Mozhovyi V. Targeted regulation of termoviscoelasticity properties of asphalt-concrete. Bulletin of the Kharkiv national university of automobile and road engineering. 2017; 79: 89–93. (In Russ.)

49. Kolesnikov G.N., Gavrilov T.A. Simulation of the conditions for a lowtemperature crack appearance in the asphalt concrete layer of a road. Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2018; 56: 57-66. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Гагарина Т.Ю. Выполнила анализ экспериментальных работ специалистов по определению энергии и вязкости разрушения асфальтобетона, на основании которого установила ориентировочные значения удельной поверхностной энергии Гриффитса и рассчитала критическую длину трещин при заданных входных условиях расчета. Написала раздел «Результаты».

Александрова Н.П. Сформулировала основную идею работы, написала разделы «Методы и материалы», выполнила общую редакцию текста.

Александров А.С. Произвел анализ методов расчета дорожных одежд, написал раздел «Введение» и предоставил результаты своего анализа соавторам для написания других разделов данной публикации.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Gagarina T.Yu. – Analysis of experimental works written on determining the energy and viscosity of asphalt concrete fracture. Establishing of the approximate values for the Griffith's specific surface energy and computation of the critical crack lengths under predetermined calculation data conditions. "Results" section development.

Aleksandrova N.P. – Main idea formulations, "Methods and Materials" section development, text editing.

Aleksandrov A.S. – Analysis of methods for calculating pavement structures and "Introduction" section development. Results for the writing of other publication sections.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гагарина Татьяна Юрьевна – магистрант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (ФГБОУ ВО «СибАДИ»), работает над магистерской диссертацией (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

Author ID (РИИЦ): 257218,

Author ID (Scopus): 57191525817,

SPIN-код: 6893-9560,

e-mail: nata26.74@mail.ru

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (ФГБОУ ВО «СибАДИ») (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

Author ID (РИИЦ): 639655,

Author ID (Scopus): 57191531014,

SPIN-код: 7573-4997,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gagarina Tatyana Yu. – Master's student, working on her Master's thesis, "Road Construction and Oper-

ation» Department, "Automobile and Road, Industrial and Civil Engineering" Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

Aleksandrova Natalya P. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, "Road Construction and Operation" Department, "Automobile and Road, Industrial and Civil Engineering" Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-code: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru

Aleksandrov Anatoliy S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, "Road Construction and Operation" Department, "Automobile and Road, Industrial and Civil Engineering" Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

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, 20–50 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, указывается индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10пт).

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, слева 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 курсивом (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 150 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «АННОТАЦИЯ» прописными буквами (шрифт полужирный, 10пт); 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. Рекомендованное 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/грантовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. **Основной текст статьи** излагается на русском или английском языках (шрифт Ariel (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 представлены 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.

8. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление 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 20–50 источников. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20. Источники, опубликованные в научных журналах, индексируемых в международных базах данных – 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, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, ORCID iD, SPIN-код, Scopus Author ID, ResearcherID, электронная почта, телефон.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной 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 правому краю, а иллюстрации – подрисуночные подписи, выравнивание по правому краю). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК ОПУБЛИКОВАНИЯ

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректур статей авторам не высылаются, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.