

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 21, № 3. 2024
Vol.21, No. 3. 2024

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-3

ТОМ 21, № 3. 2024

VOL. 21, No. 3. 2024



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) 65-03-23;

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) 65-03-23

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)», 2024

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 04.06.2024. Дата выхода в свет 17.06.2024. Формат 60×84 1/8 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)», 2024

"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 04.06.2024. Publication date is 17.06.2024. 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)", 2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Жигадло 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

Бурьянов Александр Федорович, д-р техн. наук, доц., исполнительный директор, НО «Российская Гипсовая Ассоциация», г. Москва, Россия
Scopus Author ID 55975665000; **Researcher ID** AAE-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-ЮГРПЫ», г. Сургут, Россия
Scopus AuthorID 10040194400, **ResearcherID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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

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

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

Жусупбеков Аскар Жагпарович, д-р техн. наук, проф., член-кор. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.
Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015, **ORCID ID** 0000-0001-6154-1263

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

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

Коротяев 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. проф. наук Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский

государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57200729552, **Researcher ID** AAU-8361-2020, **ORCID ID** 0000-0002-2915-982X

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

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

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

Мочалин Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

Немировский Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017, **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358

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

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

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

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

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

Рассоха Владимир Иванович, д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия
Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017, **ORCID ID** 0000-0002-7836-2242

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57159787800, **Researcher ID** A-4081-2019, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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 ID 0000-0002-0292-4421

Vitaliy S. Borovik, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Volgograd Science and Technology Center, Volgograd, Russia

Scopus Author ID 57192819653, **SPIN-код** 3552-6019,
ORCID ID 0000-0002-2409-4078

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

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

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

Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021,
ORCID ID 0000-0001-7843-7278

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015,
ORCID ID 0000-0001-6154-1263

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 57196729393, **Researcher ID** A-6227-2017,
ORCID ID 0000-0001-8494-2852

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

Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016,
ORCID ID 0000-0002-4026-820X

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

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

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

ORCID ID 0000-0002-2915-982X, **Scopus Author ID** 57200729552,
Researcher ID AAU-8361-2020

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

Scopus Author ID 56297305000, **Researcher ID** Y-3137-2018,
ORCID ID 0000-0002-7836-2242

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

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

Sergey M. Mochalin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

Yuriy V. Nemirovsky, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017, **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358

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

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

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

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

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

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

Sergey V. 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 FEPU, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова
**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗМЫ ВОЛОЧЕНИЯ..... 354**

В.Г. Зедгенизов, С.Х. Файзов
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЗОНАНСНОГО
ВИБРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ..... 366**

Ф.Р. Крупенин, Е.В. Куракина
**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ
САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАТФОРМ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ..... 376**

Е.А. Шишкин
**МЕТОД РАСЧЕТА ФАЗОВОГО УГЛА МЕЖДУ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛОЙ
ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАЛЬЦА 388**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

С.А. Аземша
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО
ТРАНСПОРТА РЕГУЛЯРНОГО СООБЩЕНИЯ 396**

А.В. Колин, П.В. Рыбаков, Н.Ю. Евреенова
**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВМЕСТИМОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА..... 412**

А.Т. Саргсян
**СИТУАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В ЕРЕВАНЕ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ
С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ..... 422**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.С. Белокопытов, В.А. Уткин, С.А. Матвеев
**МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ
МОСТА С РАЗДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛА ПО НЕЙТРАЛЬНОЙ ОСИ..... 436**

Ю.В. Краснощеков, М.Ю. Заполева
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ МЕЖДУ ПОЯСАМИ ЧЕТЫРЕХПОЯСНЫХ БАШЕН ... 452

Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен
ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ 464

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Pavel A. Grigorev, Lubov A. Sladkova
**METHODOLOGY OF CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES
TO ASSESS QUALITATIVE AND QUANTITATIVE INDICATORS
OF DRAWING PRISM FORMATION 355**

Viktor G. Zedgenizov, Sorbon H. Fayzov
**RESEARCH RESULTS OF RESONANT VIBRATION EQUIPMENT
FOR COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES ON A PHYSICAL MODEL 367**

Fedor R. Krupenin, Elena V. Kurakina
**ANALYSIS OF STRUCTURES AND MOVEMENT PARAMETRES
OF SELF-CLIMBING PLATFORMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS 377**

Evgenii A. Shishkin
**THE METHOD FOR CALCULATING PHASE ANGLE BETWEEN EXCITER FORCE
OF VIBRATION EXCITER AND ROLLER DISPLACEMENT..... 389**

PART II. TRANSPORT

Sergei A. Azemsha
**TECHNOLOGY OF REGULAR URBAN PASSENGER TRANSPORTATION OPERATION
IMPROVEMENT 397**

Aleksei V. Kolin, Pavel V. Rybakov, Nadezhda Y. Evreenova
**PECULIARITIES OF DETERMINING THE CAPACITY
OF LAND URBAN PASSENGER TRANSPORTATION VEHICLES..... 413**

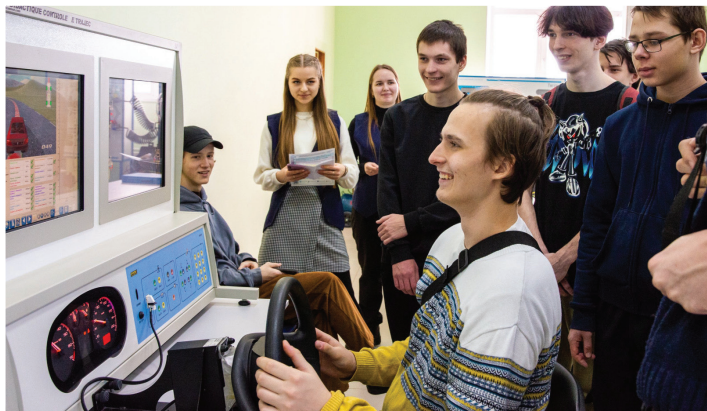
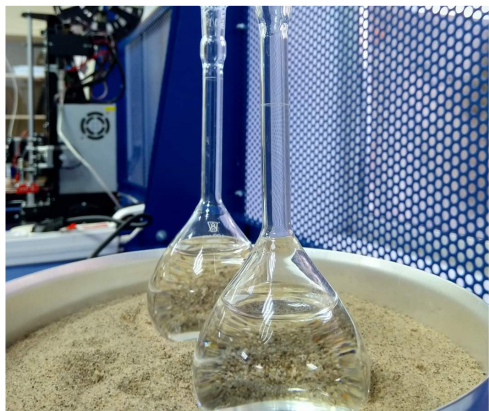
Arman T. Sargsyan
**TRAFFIC SITUATION IN YEREVAN AND WAYS TO MODERNIZE WITH
THE HELP OF CURRENT PROBLEM OF TRAFFIC CONGESTION 423**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Artem S. Belokopytov, Vladimir A. Utkin, Sergei A. Matveev
**CALCULATION METHOD FOR A STEEL-REINFORCED CONCRETE BRIDGE SPAN
STRUCTURE WITH MATERIAL SEPARATION ALONG THE NEUTRAL AXIS 437**

Yury V. Krasnoshchyokov, Maria Y. Zapoleva
REDISTRIBUTION OF EFFORTS BETWEEN THE BELTS OF FOUR-BELT TOWERS 453

Lia D. Mailyan, Nikolai O. Sizen
ASSESSMENT OF QUALITY INDICATORS IN CONSTRUCTION 465



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



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

Научная статья

УДК 629.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

EDN: KBSIAM



МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗМЫ ВОЛОЧЕНИЯ

П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова ✉Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва, Россия✉ ответственный автор
rich.cat2012@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На основании проведенного натурного эксперимента была дана оценка процесса формирования призмы волочения перед отвальной поверхностью и выявлены качественные показатели, подтверждающие теоретические исследования данного процесса.

Материалы и методы. При проведении экспериментальных исследований использовались основные положения теории планирования эксперимента, базирующиеся на методах математической статистики. В соответствии с теоретическими исследованиями процесс формирования призмы волочения перед рабочими органами землеройных машин сопровождается не только изменением скорости перемещения грунта по поверхности, происходящими в результате действия адгезионных сил и сил трения, но и возникающего в процессе перемещения грунта по криволинейной поверхности отвала ускорения Кориолиса, которое является, на наш взгляд, основной причиной неравномерного распределения грунта перед отвальной поверхностью.

Результаты. Предлагаемая методика проведения и обработки результатов эксперимента позволила выявить, что параметрами, характеризующими силу налипания грунта на поверхности рабочего органа отвального типа являются: объемная масса грунта; скорость перемещения грунта в i -й точке поверхности рабочего органа; время перемещения грунта по отвальной поверхности; коэффициент трения грунта по поверхности рабочего органа; время взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа. Методика обработки результатов эксперимента позволила выявить качественно и оценить количественно процесс формирования призмы волочения при перемещении грунта по поверхности рабочего органа в двумерном пространстве, определить изменение скоростей перемещения грунта в произвольной точке поверхности и провести верификацию рабочей гипотезы и теоретических исследований о характере изменения скоростей перемещения грунта перед отвальной поверхностью.

Обсуждение и заключение. Установлено, что для снижения липкости необходима оптимизация параметров рабочего органа, глубины копания и времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: натурный эксперимент, результаты, теоретическое обоснование, качественные показатели, количественная оценка, призма волочения, рабочий орган, машина для земляных работ, методика

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Методика проведения экспериментальных исследований для оценки качественных и количественных показателей формирования призмы волочения // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 354-365. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

© Григорьев П.А., Сладкова Л.А., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>
EDN: KBSIAM

METHODOLOGY OF CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES TO ASSESS QUALITATIVE AND QUANTITATIVE INDICATORS OF DRAWING PRISM FORMATION

Pavel A. Grigorev, Lubov A. Sladkova ✉
Russian University of Transport,
Moscow, Russia
✉ corresponding author
rich.cat2012@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Based on a full-scale experiment, the process of forming a drawing prism in front of the blade surface was assessed and qualitative indicators that confirm theoretical studies of this process were identified.

Materials and methods. In conducting experimental research, the main provisions of the theory of experimental design, based on the methods of mathematical statistics, were used. In accordance with theoretical studies, the process of formation of the drawing prism in front of the working bodies of earth-moving machines is accompanied not only by a change in the speed of soil movement on the surface, which occurs as a result of the action of adhesive forces and frictional forces, but also by the Coriolis acceleration that occurs in the process of moving soil along the curved surface of the dump, which, in our opinion, is the main reason for the uneven distribution of soil in front of the dump surface.

Results. The proposed method of conducting and processing the results of the experiment made it possible to identify that the parameters characterizing the force of soil adhesion on the surface of the working body of the dump type are: volumetric mass of soil; the speed of soil movement at the i -th point of the surface of the working body; time of soil movement on the dump surface; coefficient of friction of the soil on the surface of the working body; time of interaction of the soil with the surface of the working body. The method of processing the results of the experiment made it possible to qualitatively identify and quantitatively assess the process of formation of the drag prism when moving soil on the surface of the working body in two-dimensional space, to determine the change in the velocities of soil movement at an arbitrary point of the surface and to verify the working hypothesis and theoretical studies on the nature of the change in the velocities of soil movement in front of the dump surface.

Discussions and conclusions. It has been established that in order to reduce stickiness, it is necessary to optimize the parameters of the working body, the depth of digging and the time of interaction of the soil with the surface of the working body.

KEYWORDS: full-scale experiment, results, theoretical justification, qualitative indicators, quantitative assessment, drawing prism, working body, earthworks machine, methodology

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Grigorev P.A., Sladkova L.A. Methodology of conducting experimental studies to assess qualitative and quantitative indicators of drawing prism formation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 354-365. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

© Grigorev P.A., Sladkova L.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физико-механических свойств грунтов [1, 2, 3] как объекта разработки рабочими органами землеройных машин показало, что липкость грунта определяется его физико-механическими характеристиками: показателями влажности, типами воды в грунте, углами внешнего и внутреннего трения и т.д. В частности, например, авторы¹ считают, что липкость способствует формированию ядра уплотнения, которое способно заполнять пустоты на поверхности рабочего органа. Авторы² предполагают, что показатели процесса липкости зависят от характера взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом. Вопросам, связанным с процессом возникновения липкости и способами борьбы с ней, посвящены труды отечественных и зарубежных ученых. Развитие данного научного направления на современном этапе можно встретить также в трудах ученых Китая, Вьетнама, России [3, 4, 5]. Непосредственная взаимосвязь формирования призмы волочения с геометрическими характеристиками отвала достаточно полно отражена в работах исследователей России³, Украины и Белоруссии [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

В научной работе [14] при проведении теоретических исследований авторами было установлено, что при формировании призмы волочения перед рабочим органом отвального типа на частицы грунта, взаимодействующие с рабочей поверхностью, кроме основных сил, учитываемых авторами [1, 2], также действуют силы Кориолиса, что является основной причиной неравномерности распределения грунта по поверхности отвала и отчасти способствует налипанию грунта. Проведенный анализ состояния вопроса показал отсутствие качественных и количественных показателей формирования призмы волочения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основой для проведения экспериментальных исследований является дополнение исследований авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6] и верифика-

ция теоретических исследований [14] с целью получения качественных и количественных характеристик формирования призмы волочения с учетом адгезионных, когезионных сил и сил трения на поверхности рабочих органов землеройных машин в реальных условиях эксплуатации.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе проведения эксперимента появляется возможность изучить качественные показатели процесса копания грунта, а также провести количественную оценку исследуемых параметров.

В данном случае целью эксперимента является оценка изменения показателей усилий копания грунта рабочим органом отвального типа в процессе формирования призмы волочения.

В статье⁴ теоретически было установлено, что после отделения элементной стружки от грунтового массива (процесс резания грунта)⁵ элементная стружка начинает перемещаться по криволинейной поверхности рабочего органа землеройной машины и в процессе разработки грунта формирует призму волочения. Этот процесс наблюдается при копании грунта рабочими органами отвального, ковшового, совкового и дискового типов.

Очевидно, что в начальный момент времени, отделенная от грунтового массива стружка до момента взаимодействия с поверхностью рабочего органа находится в состоянии покоя, т.е. ее скорость равна нулю.

Далее, учитывая наличие поверхности, эта стружка начинает перемещаться по поверхности рабочего органа со скоростями, результирующая которых V является постоянной величиной, равной скорости перемещения базовой машины в процессе разработки грунта (рисунок 1).

¹Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

²Баловнев В.И. Физическое моделирование резания грунтов. М.: Машиностроение, 1969. 159 с.

³Морозов С.Ю. Моделирование параметров призмы волочения при производстве отвальных работ бульдозером KOMATSU // Сборник трудов XV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 18–21 апреля 2023 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», 2023. С. 58–62.

⁴Там же. С. 58–62.

⁵Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1990. 358 с.

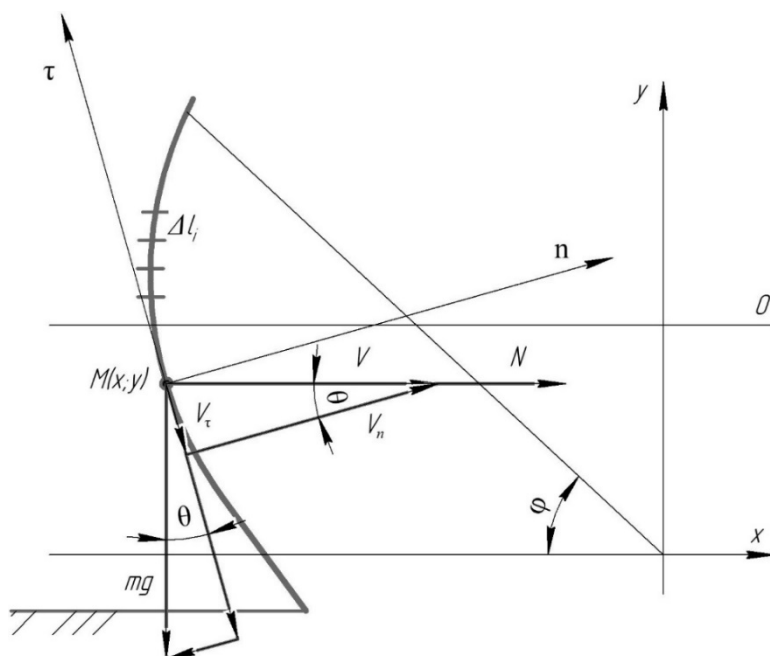


Рисунок 1 – Изменение скорости перемещения грунта по поверхности рабочего органа
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Change in the speed of soil movement on the surface of the working body
Source: compiled by the authors.

Рассмотрим некоторую массу грунта весом mg , находящуюся в произвольный момент времени в точке $M(x, y)$ криволинейной поверхности рабочего органа. При разложении поступательной скорости V грунта (скорость перемещения базовой машины при формировании призмы волочения) на составляющие V_n и V_τ , направленные соответственно по нормали n и касательной τ к криволинейной поверхности рабочего органа видно, что они равны

$$V_\tau = V \sin \theta; \quad V_n = V \cos \theta. \quad (1)$$

При этом скорость V является полным дифференциалом в проекциях на оси x и y :

$$V = \frac{\partial x}{\partial t} dt + \frac{\partial y}{\partial t} dt. \quad (2)$$

Рассмотрим изменение скорости в проекциях на оси x и y (рисунок 2).

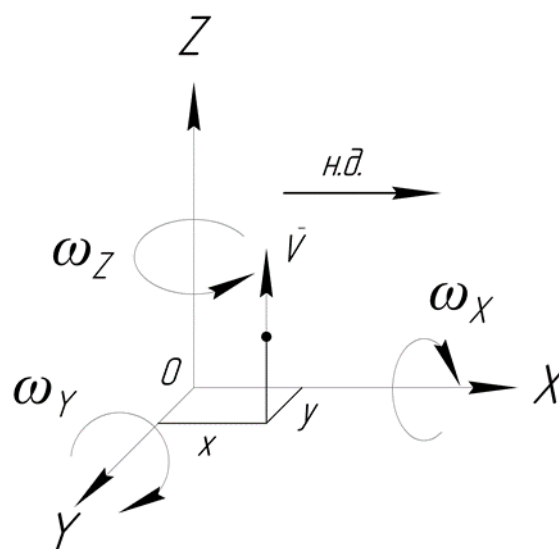


Рисунок 2 – Изменение скорости в проекциях на оси x и y
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Change of velocity in projections on the x and y axes
Source: compiled by the authors.

При этом считаем, что поверхность рабочего органа совпадает с плоскостью, то есть величина в момент контакта поверхности рабочего органа с грунтом может быть принята равной нулю из-за того, что толщина стружки по отношению к размерам призмы волочения является величиной второго порядка малости.

С другой стороны, в соответствии с зависимостью (8) [7] вектор перемещения скорости равен

$$\vec{V} = \vec{V}_{сж} + \vec{V}_{вр}, \quad (3)$$

где $\vec{V}_{сж}$ – изменение скорости перемещения грунта по отвальной поверхности за счет ее

сжатия в результате действия сил трения и липкости (адгезии);

$\vec{V}_{вр}$ – изменение скорости вращения частиц грунта по отвальной поверхности за счет в результате действия на них сил Кориолиса.

Исходя из сказанного, можно считать (рисунок 3), что процесс сжатия грунта происходит по направлению оси z за счет изменения скорости $\vec{V}_y$ и $\vec{V}_z$ (рисунок 3, б, в), а смещение направления грунтовой стружки к центру за счет сил Кориолиса происходит при развороте грунтовой стружки относительно оси Oy за счет изменения скорости $\vec{V}_x$ (рисунок 3, г).

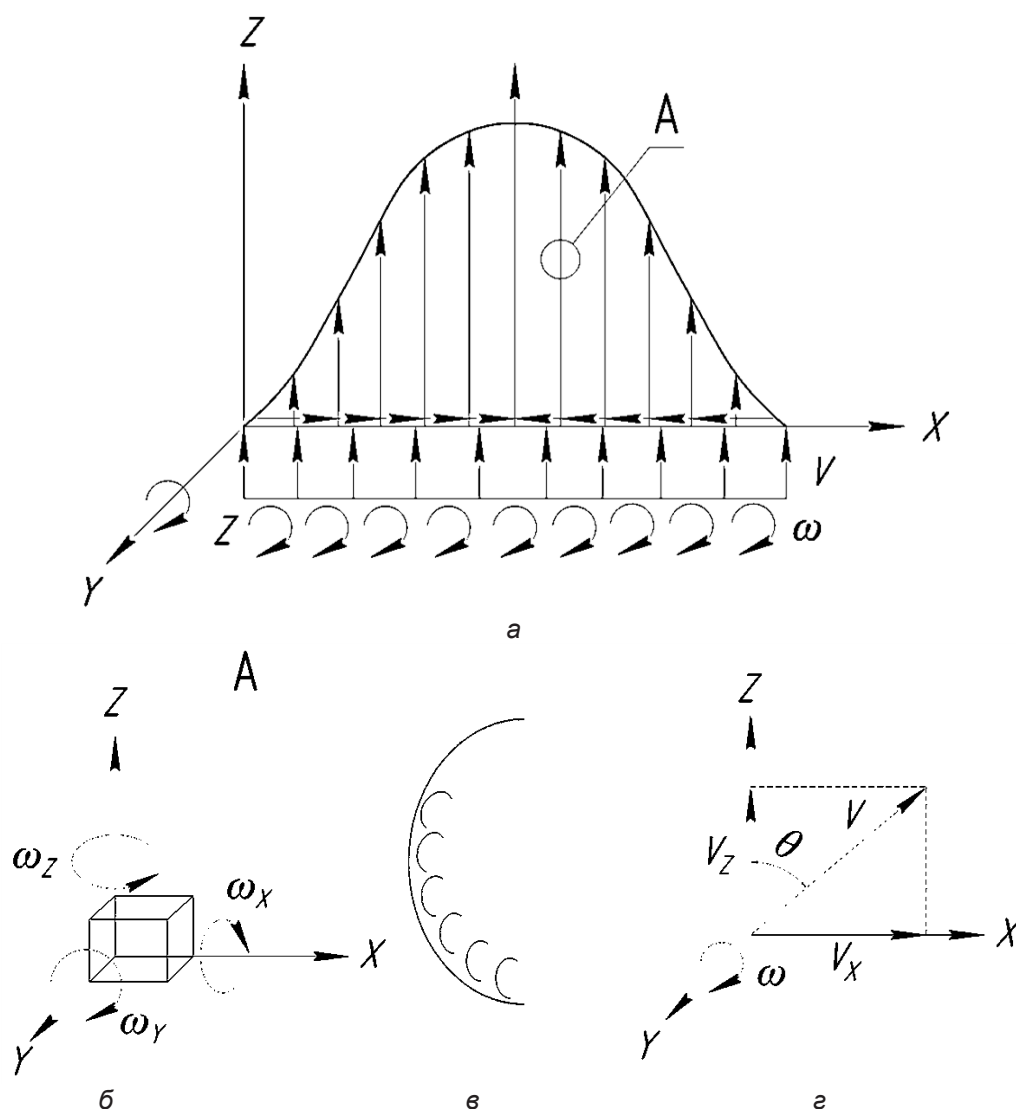


Рисунок 3 – Перемещение грунта по поверхности рабочего органа с учетом действия кориолисовых сил
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Soil movement on the surface of the working body taking into account the action of Coriolis forces
Source: compiled by the authors.

Таблица
Тактико-технические характеристики отвала
Источник: составлено авторами.

Table
Performance characteristics of the blade
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	Величина
1	Емкость отвала	м ³	5,61
2	Длина отвала	мм	3410
3	Высота отвала	мм	1425
4	Максимальное заглубление отвала в грунт	мм	500
5	Масса бульдозерного оборудования	кг	2390
6	Удельное давление на грунт	кПа	62,9

Таким образом, из изложенного установлено, что образующая при формировании призмы волочения будет представлять собой линию, представляющую степенную зависимость с четным показателем степени типа (рисунок 3, а), так как она лежит в положительном квадрате декартовой системы координат:

$$z = f(x^{2n}y^{2m}), \quad (4)$$

где m и n – показатели степени, зависящие от физико-механических свойств грунта;

x и y – изменяемые в течение времени t показатели изменения положения грунтовой стружки на поверхности отвала.

За счет снижения скорости перемещения грунта по криволинейной поверхности, что происходит из-за действия силы Кориолиса, на периферии отвала возможно налипание грунта на этих участках отвальной поверхности.

Для обоснования изложенной выше рабочей гипотезы необходимо проведение экспериментальных исследований.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились в естественных условиях эксплуатации на строительной площадке в г. Воронеже на грунте III категории трудности разработки на бульдозере с неповоротным отвалом «СИГ-МА» (D65TX-16) фирмы KOMATSU⁶, выполненным из высокопрочной стали.

Ниже приведем тактико-технические характеристики отвала (таблица).

При проведении эксперимента грунт представлял собой супесь с частичными гравийными включениями крупностью не более 5 мм. Трудность экскавации грунта определялась динамическим плотномером конструкции ДорНИИ, среднестатистическая величина которого равна $C = 12,3$ удара, что соответствует грунту третьей категории трудности разработки. Весовая влажность грунта лежала в пределах 15...18%, что соответствует минимальной величине липкости грунта на поверхности рабочего органа.

Параметры разработки грунта в процессе копания грунта отвальной поверхностью приведены ниже:

- угол резания $\alpha = 55^\circ$;
- угол установки отвала – 72° .

В соответствии с рекомендациями проведения экспериментальных исследований⁷ [11] число параллельных опытов, проводимых при идентичных условиях, было равно 3. Каждая серия опытов проводилась на различной глубине копания (100, 200 и 300 мм).

При проведении экспериментальных исследований перемещение бульдозера было прямолинейным со скоростью 4 км/ч (1,1 м/с). Процесс копания фиксировался на видеокамеру, закрепленную на отвальной поверхности на некотором расстоянии от отвала и позволяющую фиксировать процесс копания грунта и формирование призмы волочения до полного набора (рисунок 4).

⁶ Bul'dozer Komatsu D65EX-16 // «GreenLight». Режим доступа: <https://gltm.ru/katalog/avtobusy/buldozer-komatsu-d65ex-16> (дата обращения: 01.04.2024).

⁷ Сладкова Л.А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин: учебное пособие. М.: МГУПС (МИИТ), 2016. 275 с.



Рисунок 4 – Процесс копания грунта:
 а – отделение элементной стружки;
 б – начало формирования призмы волочения (подъем грунта вверх по отвалу);
 в – полная призма волочения
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Soil digging process:
 а – separation of elemental chips;
 б – the beginning of the formation of the drawing prism (lifting the soil up the blade);
 в – full lug prism
 Source: Compiled by the authors.

На рисунке 4, а видно, что левый край отвала имеет большее заглубление, чем правый, что в дальнейшем будет оказывать влияние на формирование призмы волочения.

Число полученных кадров при проведении эксперимента зависело от времени отделения элементной стружки от грунтового массива и отличались друг от друга. В свою очередь время отделения стружки от грунтового массива зависело от величины заглубления отвала в грунт.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задачами при обработке результатов эксперимента является:

- оценка формирования призмы волочения при перемещении грунта по поверхности рабочего органа, т.е. по направлениям осей z и x ;
- определение скоростей перемещения грунта в произвольной точке поверхности;
- верификация зависимости (3) рабочей гипотезы и теоретических исследований.

Отснятый в процессе проведения эксперимента материал по набору призмы волочения подвергался кадрированию с частотой 1 кадр /с. Говоря другими словами, отснятый видеоматериал, продолжительность действия которого в течение времени t соответствовала набору полной призмы волочения перед отвальной поверхностью. При обработке информации для каждой серии опытов были выбраны кадры с равной периодичностью через три секунды, начиная с момента вырезания элементной стружки.

На рисунке 5 видно, что материал каждого кадра представляет собой трехмерную перспективу.

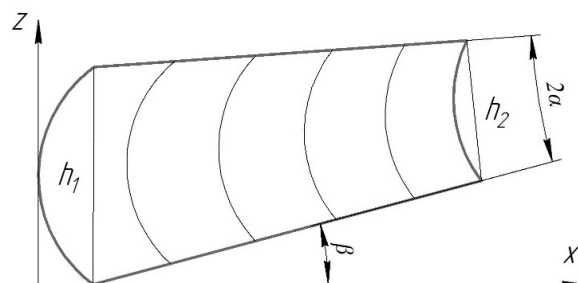


Рисунок 5 – Отвал бульдозера в перспективе
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Bulldozer blade in perspective
 Source: compiled by the authors.

Для оценки закономерностей формирования призмы волочения разобьем отвал на секции по длине на 5 частей, направленных по перспективной оси, проходящей вдоль отвала, что позволяет оценить изменения, происходящие при формировании призмы волочения по осям z и x .

Учитывая то, что эксперимент проводился в реальных условиях эксплуатации, сопровождающийся задержками момента начала движения с включенной камерой, рекомендуется для получения реальной картины формирования призмы волочения выбор кадрированных фотографий начинать не с первого кадра. Например, в первом эксперименте он начинался с 16 кадра, во втором – с 35, в третьем с 26.

Номер каждого последующего кадра был третьим, что позволило фиксировать время (3 с) для каждого этапа набора призмы волочения. Таким образом, зная фиксированное время изменения положения грунта по каждому последующему кадру и измерив расстояние, на которое переместится грунт за это время, определяется среднестатистическая скорость перемещения грунта по отвальной поверхности. Это положение основано на том, что каждая вырезаемая стружка грунта проходит между призмой волочения и отвальной поверхностью. При этом на нее, в соответствии с исследованиями авторов^{8,9}, между контактирующими поверхностями возникают в первом случае силы трения и силы адгезии между грунтом и отвальной поверхностью, а во втором случае силы внутреннего трения между частицами грунта.

Для учета погрешности размеров, полученных в результате ведения съемки по каждому кадру, определялись масштабные коэффициенты по высоте k_h и длине k_L .

Для перехода от параметров кадра к параметрам оригинала величина масштабирования (мм/м) определялась по зависимостям:

$$k_h = \frac{h_{iM}}{h_{10}}; \quad (5)$$

$$k_L = \frac{L_{iM}}{L_0}, \quad (6)$$

где h_{iM} и L_{iM} – размеры высоты и длины отвала на кадре соответственно, мм;

$h_{10}=1,425$ и $L_0=3,410$ – размеры высоты и длины отвала в оригинале в соответствии с паспортными данными, м.

Для оценки изменения скорости перемещения грунта вверх по отвальной поверхности определим высоту Δl_i подъема грунта по отвальной поверхности в соответствии с его положением на каждом последующем кадре (рисунок 4).

Зная скорость перемещения бульдозера и время до набора полной призмы волочения, оценим время t_i , приходящееся на каждый кадр по зависимости

$$t_i = \frac{t}{N}, \quad (7)$$

где t – время копания грунта до набора полной призмы волочения;

N – число кадров.

Учитывая, что кадры выбирались через одинаковый интервал, очевидно, что для всех x участков величина $t_i=3$ с будет одинаковая. Тогда скорость на каждом последующем участке Δl_i будет равна

$$v_i = \frac{2\Delta l_i}{t} - v_{i-1}, \quad (8)$$

где v_{i-1} – скорость перемещения грунта на предыдущем участке.

Очевидно, что в начальный момент разработки грунта скорость v_{i-1} равна скорости перемещения бульдозера, т.е. равна 1,1 м/с.

Для упрощения расчетов воспользуемся схемой, приведенной на рисунке 6.

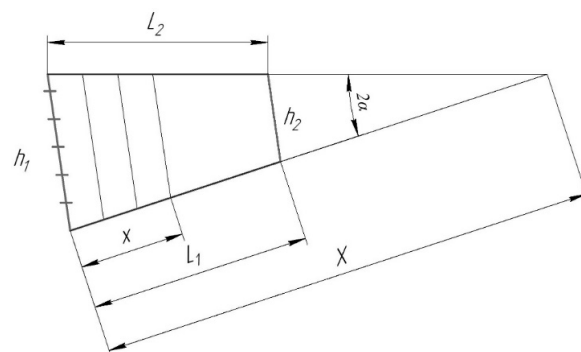


Рисунок 6 – Схема для определения параметров призмы волочения в процессе копания грунта
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Diagram for determining the parameters of the drawing prism in the process of digging the soil
Source: compiled by the authors.

Здесь величину подъема грунта по отвалу в произвольной точке определим по теореме Фалеса:

$$y = \frac{\Delta l_i}{x} (h_1 - h_2), \quad (9)$$

где h_1 и h_2 – высота отвала в перспективе в соответствии с рисунком 6.

⁸Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

⁹Баловнев В.И. Физическое моделирование резания грунтов. М.: Машиностроение, 1969. 159 с.

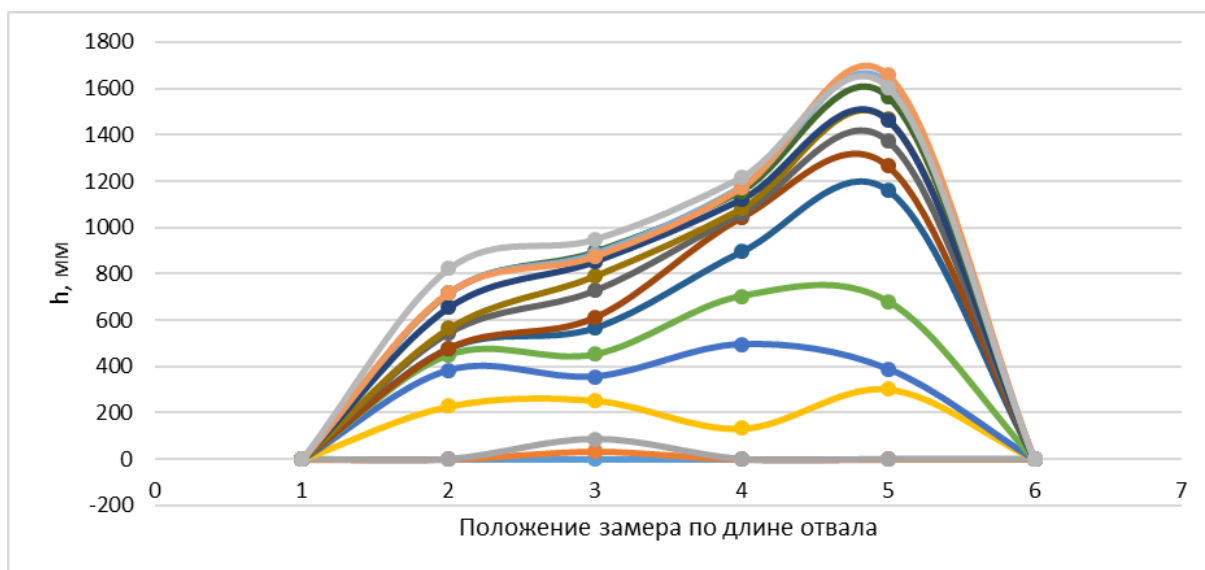


Рисунок 7 – Процесс качественных изменений положения грунта при формировании призмы волочения [EXCEL]
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The process of qualitative changes in the position of the soil during the formation of the drawing prism [EXCEL]
Source: compiled by the authors.

Далее проводим проверку результатов эксперимента на воспроизводимость по критерию Кохрена (²).

Результаты обработки эксперимента занесли в специально разработанные таблицы, учитывающие кадрирование процесса формирования призмы волочения, изменение размеров призмы в соответствии с методикой, представленной на рисунках 5, 6.

Глубина копания оказывает существенное влияние на процесс формирования призмы волочения. В качественном выражении этот процесс можно отследить на рисунке 7.

Представленные на рисунке 7 кривые характеризуют качественный процесс формирования призмы волочения перед отвальной поверхностью, что согласуется с гипотезой о влиянии на этот процесс сил Кориолиса. Причем каждая кривая показывает изменение положения частиц грунта (пройденное расстояние Δl_i) относительно нижней кромки ножа отвала за заданный промежуток времени (3 с).

Выше отмечалось, что в результате неровности поверхности разрабатываемого грунта (см. рисунок 4), зарезание левой стороной

отвала происходило на большей глубине, что привело к увеличению объема призмы волочения с этой стороны, т.е. более быстрому ее формированию.

На рисунке 7 видно, что высота набора призмы превышает высоту реальной отвальной поверхности. Погрешность составляет 16%, что допустимо при проведении натурных экспериментов.

Очевидно, что изменение призмы волочения по высоте отвала Δl_i равна

$$\Delta l_i = v_{i-1}t + \frac{v_i - v_{i-1}}{2}t. \quad (10)$$

В соответствии с законом сохранения количества движения¹⁰ имеем

$$\frac{m_i(v_i - v_{i-1})}{t} = F, \quad (11)$$

где F – усилие перемещения грунта массой m_i по поверхности рабочего органа в течение времени t .

Масса грунта перед поверхностью рабочего органа равна

¹⁰ Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.

$$m_i = \gamma h L \sum_{i=1}^n \Delta l_i, \quad (12)$$

где γ – объемная масса грунта, кг/м³;
 h – глубина копания, м;
 L – длина отвала, м.

Тогда сила налипания грунта на поверхность рабочего органа будет равна

$$F_H = F - F_{mp}, \quad (13)$$

где F_{mp} – сила трения грунта по поверхности рабочего органа, Н;

F_H – сила налипания, Н.

Данное положение подтверждается результатами исследований И.В. Крагельского¹¹ при получении суммарного коэффициента трения, являющегося результатом действия адгезионных и когезионных сил. Применительно к трению материалов составляющую адгезионную компоненту коэффициента трения f_{ad} предлагается оценивать по зависимости

$$f_{ad} = \frac{\tau}{HB}, \quad (14)$$

где τ – величина касательного напряжения при трении, Па;

HB – твердость материала по Бринеллю, Па.

С другой стороны, видно, что «при внешнем трении (в нашем случае мы рассматриваем только факт взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа), материал перемещается в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости, при этом характер перемещения носит «синусоидальный характер», что подтверждает наши исследования.

В этом случае «величину адгезии» (автор⁷, наверное, имел в виду коэффициент адгезии) рекомендуется определять по зависимости

$$f_{ad} = \frac{\tau}{\sigma_s}, \quad (15)$$

где σ_s – величина предела текучести материала (грунта), Па.

Силу трения грунта по поверхности рабочего органа определим по формуле (см. рисунок 1):

$$F_{mp} = F_n f = m_i g f \sin \theta, \quad (16)$$

где F_n – сила нормального давления грунта массой на поверхность рабочего органа, Н;

f – коэффициент трения грунта по поверхности рабочего органа.

Используя зависимости (10), (11), (12) и (13) преобразуем выражение (16).

Усилие налипания грунта на поверхность рабочего органа будет равна

$$\begin{aligned} F_H &= \frac{m(v_i - v_{i-1})}{t} - m_i g f \sin \theta = \\ &= \frac{m_i(v_i - v_{i-1})}{t} - m_i g f \sin \theta = \\ &= \gamma h L \Delta l_i \sum_{i=1}^n \left(\frac{(v_i - v_{i-1})}{t} - g f \sin \theta \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что сила налипания грунта на поверхность рабочего органа зависит от следующих параметров:

- объемной массы грунта;
- объема призмы волочения;
- скорости перемещения грунта в -й точке поверхности рабочего органа;
- коэффициента трения грунта по поверхности рабочего органа;
- времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

Очевидно, что снижению этого параметра способствуют снижение глубины копания, длины отвала и увеличение времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа, что подтверждает исследования авторов статьи [15]. В первом случае это ведет к снижению производительности, а во втором – к возрастанию усилий копания грунта.

Анализ зависимости (17) позволяет определить рациональное время копания грунта до набора полной призмы волочения:

$$t_i \leq \frac{(v_i - v_{i-1})}{g f \sin \theta}. \quad (18)$$

Зная силу налипания грунта, определяемую по зависимости (17), вычислим тангенциальную составляющую напряжения в грунте в процессе формирования призмы волочения по формуле

$$\tau \leq \frac{F_H}{S}, \quad (19)$$

где S – площадь контакта грунта с поверхностью отвала, м².

¹¹ Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой исследований, рассматриваемых в статье, являются предлагаемые методики проведения эксперимента и обработки результатов экспериментальных данных, которые позволили провести качественную и количественную оценку процесса формирования призмы волочения при перемещении грунта по отвальной поверхности. Исходя из полученных результатов, установлены теоретические зависимости, позволяющие определять изменение скоростей перемещения грунта в произвольной точке отвальной поверхности, провести верификацию рабочей гипотезы и предложить мероприятия по выбору рациональных параметров, влияющих на процесс копания грунта: для снижения липкости необходима оптимизация параметров рабочего органа, глубины копания и времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Belousov S.V., Saprykin E.A., Karmazin I.S. Explanation of the angle of sharpening of a plough cutting working body. *E3S Web of Conferences*. Sevastopol: EDP Sciences. 2019. P. 00025. DOI 10.1051/e3sconf/201912600025.
2. Zenkov S.A. Application of thermal effect as a means to combat ground-and-machine part adhesion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2020. P. 32060. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032060.
3. Ren L., Cong Q., Tong G., Chen B. Reducing adhesion of soil against load-ing shovel using bionic electro-osmosis method. *Journal of Terramechanics*. 2001; 38: 211–219.
4. Yang X., Xia R., Zhou H., Guo L., Zhang L. Bionic surface design of cemented car-bide drill bit. *Science China Technological Sciences*. 2016; 59: 175–182.
5. Tagar A.A., Ji C., Ding Q. fan etc. Soil failure patterns and draft as influ-enced by consistency limits: An evaluation of the remolded soil cutting. 2014; 137: 58–66.
6. Ничке В.В., Тулузов А.Г. Формирование призмы волочения и определение рациональных отношений высоты и ширины отвала // ХНАД, Харьков. Режим доступа <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-prizmy-volocheniya-i-opredelenie-ratsionalnyh-otnosheniy-vysoty-i-shiriny-otvala> (дата обращения: 07.04.2024)
7. Берестов Е.И., Лесковец И.В. Методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 2(23). С. 6–12. Режим доступа: <https://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/1449/57253243> (дата обращения: 07.04.2024)

8. Шемякин С.А., Гамоля Ю.А., Шишкин Е.А. Сопротивление копанию несвязных грунтов отвалом бульдозера // Ученые заметки ТОГУ, Хабаровск. 2016. Том 7, № 1. С. 217–219.

9. Берестов Е.И., Лесковец И.В. Влияние свойств грунта на усилия сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Машиностроение и машиноведение. 2011. № 3. С. 45–52.

10. Сурашов Н.Т., Асматулаев Р.Б., Толымбек Д.Н. Определение оптимальных конструктивных параметров отвала бульдозера // Вестник СибАДИ. 2022;19(4): 500–513. <https://doi.org/10/26518/2071-7296-2022-19-4-500-513/>

11. Мячникова Н.Н. Бульдозерный отвал типа «Сигма» // Молодой ученый. 2017. № 3(137). С. 129–132. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/137/38571/> (дата обращения: 18.02.2024).

12. Беляев В.В. Математическая модель поверхности грунта, обрабатываемой автогрейдером // Строительные и дорожные машины. 2006. № 8. С. 33–39.

13. Шукуров Н.Р., Мухамадиев Г.М., Абиджанов З.Х. Основные направления интенсификации рабочих процессов землеройно-транспортных машин // Молодой ученый. 2020. № 12(302). С. 61–65. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (дата обращения: 17.04.2024).

14. Сладкова Л.А., Григорьев П.А. Модель формирования призмы волочения при разработке грунта рабочими органами отвального типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 576–581. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-576-577.

15. Шукуров Н.Р., Мухамадиев Г.М., Абиджанов З.Х. Основные направления интенсификации рабочих процессов землеройно-транспортных машин // Молодой ученый. 2020. № 12(302). С. 61–65. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (дата обращения: 17.04.2024).

REFERENCES

1. Belousov S.V., Saprykin E.A., Karmazin I.S. Explanation of the angle of sharpening of a plough cutting working body. *E3S Web of Conferences*. Sevastopol: EDP Sciences. 2019: 00025. DOI 10.1051/e3sconf/201912600025.
2. Zenkov S.A. Application of thermal effect as a means to combat ground-and-machine part adhesion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2020: 32060. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032060.
3. Ren L., Cong Q., Tong G., Chen B. Reducing adhesion of soil against load-ing shovel using bionic electro-osmosis method. *Journal of Terramechanics*. 2001; 38: 211–219.
4. Yang X., Xia R., Zhou H., Guo L., Zhang L. Bionic surface design of cemented car-bide drill bit. *Science China Technological Sciences*. 2016; 59: 175–182.

5. Tagar A.A., Ji C., Ding Q. fan etc. Soil failure patterns and draft as influ-enced by consistency limits: An evaluation of the remolded soil cutting. 2014; 137: 58–66.

6. Nichke V.V., Tuluzov A.G. Formation of the prism of volocheniya and the definition of rational relations of height and width of the dump. HNAD, Kharkov, Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-prizmy-volocheniya-i-opredelenie-ratsionalnyh-otnosheniy-vysoty-i-shiriny-otvala> (accessed: 07.04.2024) (In Russ.)

7. Berestov E.I., Leskovets I.V. Methods of calculation of geometric parameters of the prism of dragging on the bulldozer's dump. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2009; 2(23): 6–12 Available at: <https://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/1449/57253243> (accessed: 07.04.2024) (In Russ.)

8. Shemyakin S.A., Gamolya Yu.A., Shishkin E.A. Resistance to digging of non-cohesive soils with a bulldozer dump. *Electronic scientific journal «Scientists notes PNU»*. 2016; Vol. 7, No. 1: 217–219. (In Russ.)

9. Berestov E.I., Leskovets I.V. Influence of soil properties on the efforts of resistance to digging by bulldozer working equipment. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye*. 2011; 3: 45–52. (In Russ.)

10. Surashov N.T., Asmatulaev R.B., Tolymbek D.N. Blade optimal design parameters determination. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 500–513. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

11. Myachnikova N. N. Bulldozer dump of the Sigma type. *Molodoj uchenyj*. 2017; 3(137): 129–132. Available at: <https://moluch.ru/archive/137/38571/> (accessed: 18.02.2024). (In Russ.)

12. Belyaev V.V. Mathematical model of the surface of the soil, processed by the motor grader. *Construction and building machinery*. 2006: 8: 33–39. (In Russ.)

13. Shukurov N.R., Mukhamadiev G.M., Abidjanov Z.Kh. Main directions of intensification of working processes of earth-transport machines. *Molodoj uchenyj*. 2020; 12(302): 61–65. Available at: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (accessed: 17.04.2024). (In Russ.)

14. Sladkova L.A., Grigorev P.A. Formation model of the drawin g prismatic solid during the development of soil by workin g bodies of the blade type. «*Izvestiya Tula State University*» (*Izvestiya TulGU*). 2024; 1: 576–581. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-576-577. (In Russ.)

15. Shukurov N.R., Mukhamadiev G.M., Abidjanov Z.Kh. Main directions of intensification of working processes of earth-transport machines. *Molodoj uchenyj* 2020; 12(302): 61–65. Available at: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (accessed: 17.04.2024). (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Григорьев П.А. Организация и проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Сладкова Л.А. Формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, написание текста статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Grigorev P.A. Experimental research managing, experimental data processing, material for the article preparation.

Sladkova L.A. Research purposes and objectives statement, research methodology development, the text of the article writing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Павел Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры наземных транспортно-технологических средств Российского университета транспорта (МИИТ) (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5409-6250>, **SPIN-код:** 1305-7521, e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru

Сладкова Любовь Александровна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры наземных транспортно-технологических средств Российского университета транспорта (МИИТ) (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>, **SPIN-код:** 9088-6547, e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Grigorev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Ground Transport and Technological Means Department, Russian University of Transport (MIIT) (9 Obratsova str., p. 9, Moscow, 127994), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5409-6250>, **SPIN-код:** 1305-7521, e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru

Lyubov A. Sladkova – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Ground Transport and Technological Means Department, Russian University of Transport (MIIT) (9 Obratsova str., p. 9, Moscow, 127994), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>, **SPIN-код:** 9088-6547, e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

Научная статья

УДК 621.01

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-366-375>

EDN: GPTMAY



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЗОНАНСНОГО ВИБРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В.Г. Зедгенизов ✉, С.Х. Файзов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия✉ ответственный автор
vzedgenizov@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данной статьи является подтверждение результатов исследований резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей, полученных на математической модели. Объектом исследований является колебательная система резонансного вибрационного оборудования, состоящая из двух масс, связанных между собой упругим и диссипативным элементом. Кроме того, первая масса через упругий и диссипативный элемент соединена с неподвижным основанием.

Материалы и методы. В исследованиях использованы основные положения теории подобия и статистической обработки экспериментальных данных. Необходимое количество повторных опытов устанавливалось статистическим путем, а воспроизводимость эксперимента проверялась по критерию Кохрена.

Результаты. Разработаны критерии и индикаторы подобия процессов, протекающих в системе резонансного вибрационного оборудования, предложены формулы перехода от параметров природы к параметрам физической модели. Представлена техническая характеристика физической модели.

В ходе эксперимента получены осциллограммы перемещений вибратора и рабочего органа, которые сдвинуты друг относительно друга на угол $\pi/2$. При этом амплитуда колебаний вибратора существенно превосходит амплитуду колебаний рабочего органа.

Обсуждение и заключение. Представленные зависимости амплитуд, полученных на математической и физической модели, качественно повторяют друг друга. В исследованном диапазоне изменения частоты вынуждающей силы максимальная ошибка составляет 12%. Это подтверждает результаты, полученные на математической модели резонансного вибрационного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: физическая модель, критерии подобия, статистическая обработка экспериментальных данных

Статья поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Результаты исследований резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей на физической модели // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 366-375. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-366-375>

© Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-366-375>

EDN: GPTMAY

RESEARCH RESULTS OF RESONANT VIBRATION EQUIPMENT FOR COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES ON A PHYSICAL MODEL

Viktor G. Zedgenizov ✉, Sorbon H. Fayzov
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian
✉ corresponding author
vzedgenizov@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this article is to confirm the results of research on resonant vibration equipment for compacting concrete mixtures obtained using a mathematical model. The object of research is an oscillatory system of resonant vibration equipment consisting of two masses interconnected by elastic and dissipative elements. In addition, the first mass is connected to a fixed base through elastic and dissipative elements.

Materials and methods. The main provisions of the theory of similarity and statistical processing of experimental data are used in the research. The required number of repeated experiments was determined statistically, and the reproducibility of the experiment was verified by the Cochran criterion. Results. The criteria and indicators of similarity of processes occurring in the system of resonant vibration equipment have been developed, formulas for the transition from the parameters of nature to the parameters of the physical model have been proposed. The technical characteristics of the physical model are presented.

During the experiment, oscillograms of the movements of the vibrator and the working body which are shifted relative to each other by an angle of $\pi/2$ were obtained. At the same time, the amplitude of vibrations of the vibrator significantly exceeds the amplitude of vibrations of the working body.

Discussions and conclusions. The presented dependences of the amplitudes obtained on mathematical and physical models qualitatively repeat each other. In the studied frequency range of the driving force, the maximum error is 12%. This confirms the results obtained on the mathematical model of resonant vibration equipment.

KEYWORDS: physical model, similarity criteria, statistical processing of experimental data

The article was submitted 01.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Zedgenizov V.G., Fayzov S.H. Research results of resonant vibration equipment for compaction of concrete mixtures on a physical model. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 366-375. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-366-375>

© Zedgenizov V.G., Fayzov S.H., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы научных исследований включают в себя системный анализ, математическое моделирование, проведение экспериментальных исследований. Широкое распространение получило математическое моделирование как наиболее удобное средство изучения самых разнообразных объектов и процессов. Его преимущества неоспоримы: экономичность (в части сбережения ресурсов реальной системы), возможность моделирования гипотетических, то есть не реализованных в природе объектов, изучение режимов опасных или трудновоспроизводимых процессов и др. [1].

Однако надежность результатов моделирования во многом зависит от принятых допущений, используемых методов расчета и других факторов. Поэтому для проверки адекватности результатов математического моделирования необходимо их экспериментальное подтверждение.

Цель исследований – подтверждение результатов, полученных на математической модели резонансного вибрационного оборудования [2, 3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований разработана физическая модель резонансного вибрационного оборудования.

Научно-методической основой разработки физических моделей является теория подобия, которая дает возможность установить подобие или разработать способы его достижения^{1,2,3}. Подобными являются такие физические системы, у которых подобны все характеризующие их параметры: векторные величины геометрически подобны, а скалярные – пропорциональны в соответствующих точках пространства и в соответствующие моменты времени^{4,5,6}. Подобие характеризуется пропорциональностью всех величин, определяющих их качественную и количественную сторону [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Для установления подобия разработаны критерии подобия процессов, протекающих в подсистеме «резонансное вибрационное оборудование»:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{L_i}{l_i}; \Pi_2 = \alpha_i; \Pi_3 = wt; \Pi_4 = Aw; \Pi_5 = \frac{\rho l^3}{m}, \\ \Pi_6 &= \frac{Aw^2 m}{P}; \Pi_7 = \frac{Awk}{P}; \Pi_8 = \frac{Ac}{P}; \Pi_9 = \frac{mr^2 w^3}{N}, \end{aligned}$$

где L_i и l_i – определяющий линейный размер натурального образца и модели, м; α_i – угловой размер, рад; w – угловая скорость, рад/с; t – время, с; A – амплитуда колебаний, м; ρ – плотность материала изделия, кг/м³; m – масса, кг; P – усилие, Н; k – коэффициент демпфирования, Нс/м; c – жесткость упругого элемента, Н/м; N – мощность, Вт; r – эксцентриситет, м.

Под индикаторами подобия понимаются отношения масштабов сходственных величин (сил, масс и т.п.). Равенство индикаторов подобия означает моделирование сходственных параметров процесса в одном масштабе.

Независимые индикаторы подобия выбираются произвольным образом:

$$k_l = 2; k_\alpha = 1; k_t = 1; k_\rho = 1; k_g = 1.$$

Это означает, что линейные размеры физической модели уменьшены в два раза, а угловые остаются без изменения; моделирование предполагается проводить в реальном времени и в условиях земного тяготения, материал модели остается тот же, что и у оригинала.

Тогда зависимые индикаторы подобия определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} k_w &= \frac{1}{k_t}; k_A = \frac{1}{k_w}; k_m = k_\rho k_l^3; \\ k_P &= k_A k_w^2 k_m; k_k = \frac{k_P}{k_A k_w}; k_c = \frac{k_P}{k_A}; \\ k_N &= k_m k_l^2 k_w^3. \end{aligned} \quad (13)$$

¹ Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. М.: Высш. школа, 1981. 335 с.

² Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.

³ Вишневский А.С., Балаганский И.А. Критерии подобия для ударных процессов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 1998. № 1. С. 151–153.

⁴ Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.

⁵ Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.

⁶ Хазанович Г.Ш., Ляшенко Ю.М. Критерии подобия при физическом моделировании рабочих процессов погрузочно-транспортных модулей // Моделирование. Теория, методы и средства. Материалы международной научно-практической конференции. 2001. С. 29–33.

Формулы перехода от параметров натуры к параметрам модели представлены в таблице 1.

Таблица 1
Формулы перехода от параметров натуры к параметрам модели
Источник: составлено авторами.

Table 1
Formulas for the transition from nature parameters to model parameters
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Наименование параметра	Формула перехода
1	Линейный размер	$l_m = l_n / k_l$
2	Угловой размер	$\alpha_m = \alpha_n$
3	Угловая скорость	$w_m = w_n$
4	Амплитуда	$A_m = A_n$
5	Масса	$m_m = m_n / k_l^3$
6	Усилие	$P_m = P_n / k_l^3$
7	Демпфирование	$k_m = k_n / k_l^3$
8	Жесткость	$c_m = c_n / k_l^3$
9	Мощность	$N_m = N_n / k_l^5$

По формулам перехода разработана и изготовлена лабораторная установка (рисунок 1), технические характеристики которой представлены в таблице 2.

Таблица 2
Технические характеристики лабораторной установки
Источник: составлено авторами.

Table 2
Technical characteristics of the laboratory installation
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Наименование параметра	Модель	Натурный образец
1	Масса рабочего органа, кг	50	400
2	Масса вибратора, кг	12,5	100
3	Коэффициент жесткости рабочего органа, кН\м	165 000	1 320 000
4	Коэффициент жесткости вибратора, кН\м	21 250	170 000
5	Коэффициент демпфирования вибратора, Нс\м	380	3040
6	Статический момент дебалансов, кгм	0,05	0,8
7	Амплитуда колебаний рабочего органа, мм	1,0	1,0
8	Частота колебаний, рад\с	130	130
9	Мощность, кВт	0,375	12

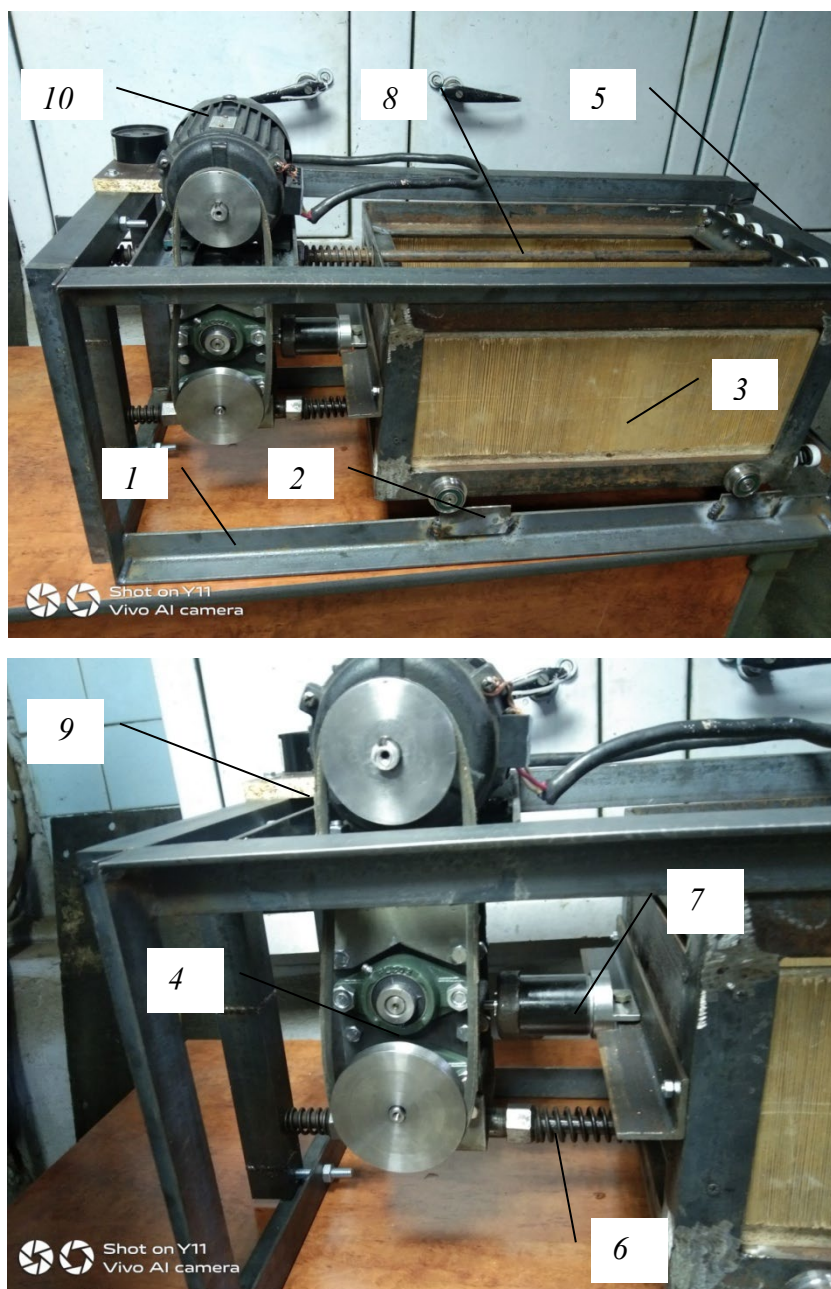


Рисунок 1 – Лабораторная установка:
 1 – рама; 2, 8 – направляющие; 3 – тележка; 4 – вибратор;
 5, 6 – упругие элементы; 7 – демпфер; 9 – клиноременная передача;
 10 – электродвигатель
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Laboratory installation:
 1 – frame; 2, 8 – guides; 3 – trolley; 4 – vibrator;
 5, 6 – elastic elements; 7 – damper; 9 – V-belt transmission;
 10 – electric motor
 Source: compiled by the authors.

Установка состоит из рамы 1, внутри которой на направляющих 2 установлена тележка 3 и дебалансный вибратор направленного действия 4. Тележка 3, с одной стороны, через упругие элементы 5 связана с рамой 1, с другой – через упругие элементы 6 и демпфер 7 соединяется с дебалансным вибратором 4, который перемещается по направляющим 8. Направляющие 8 жестко связаны с рамой 1. Дебалансный вибратор 4 приводится в действие клиноременной передачей 9 от электродвигателя 10, который управляется частотным регулятором.

Установка позволяет изменять угловую скорость дебалансного вибратора за счет скорости вращения электродвигателя, вынуждающую силу вибратора, – путем набора сменных дебалансов, жесткость упругих элементов 5 – одновременно установленным их количеством, массу тележки 3 – количеством засыпаемого в тележку песка.

Результаты экспериментов должны обладать достаточной надежностью, которая при

моделировании зависит не только от степени соответствия модели натурному образцу, но и метода измерений, измерительной аппаратуры, квалификации экспериментатора^{7, 8}.

Методика проведения эксперимента предполагает установление зависимости амплитуд колебаний рабочего органа и вибратора от частоты вынуждающей силы. Для этого при помощи частотного преобразователя изменялось число оборотов приводного электродвигателя в диапазоне от 500 об/мин до 1100 об/мин с интервалом в 100 об/мин. Остальные параметры оставались неизменными.

Необходимое количество повторных опытов устанавливалось статистическим путем, а воспроизводимость эксперимента проверялась по критерию Кохрена [16].

Эксперименты проводились с использованием современной регистрирующей аппаратуры: шасси National instruments Hispeed USB Carrier NI USB-9162 для модулей С-серии; модуль (регистратор) ввода С-серии NI 9234; вибропреобразователь AP85-100 (рисунок 2).

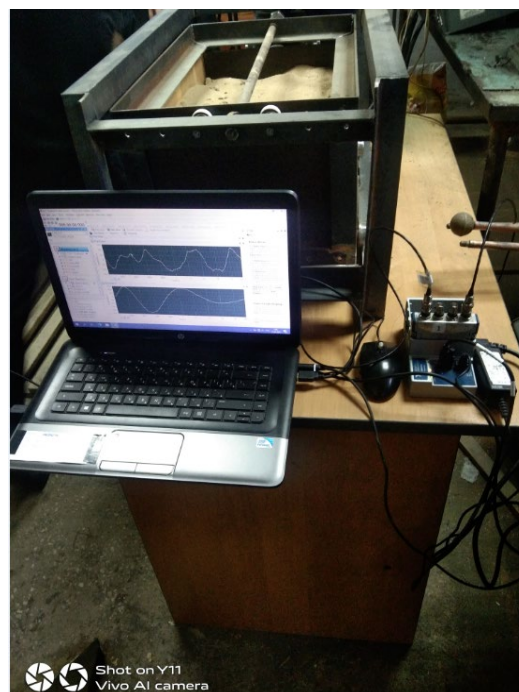


Рисунок 2 – Регистрирующая аппаратура
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Recording equipment
Source: compiled by the authors.

⁷ Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. Изд. 2-е; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. 121 с.

⁸ Завадский Ю. В. Методика статистической обработки экспериментальных данных. М.: МАДИ, 1973. 97 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 3 показан пример осциллограммы колебаний рабочего органа и дебалансно-го вибратора.

Из примера видно, что перемещения масс сдвинуты относительно друг друга на угол $\pi/2$, а амплитуда колебаний вибратора существен-

но превосходит амплитуду колебаний рабоче-го органа.

Результаты экспериментов по определе-нию амплитуды колебаний рабочего органа от угловой скорости вибратора представлены в таблице 3.

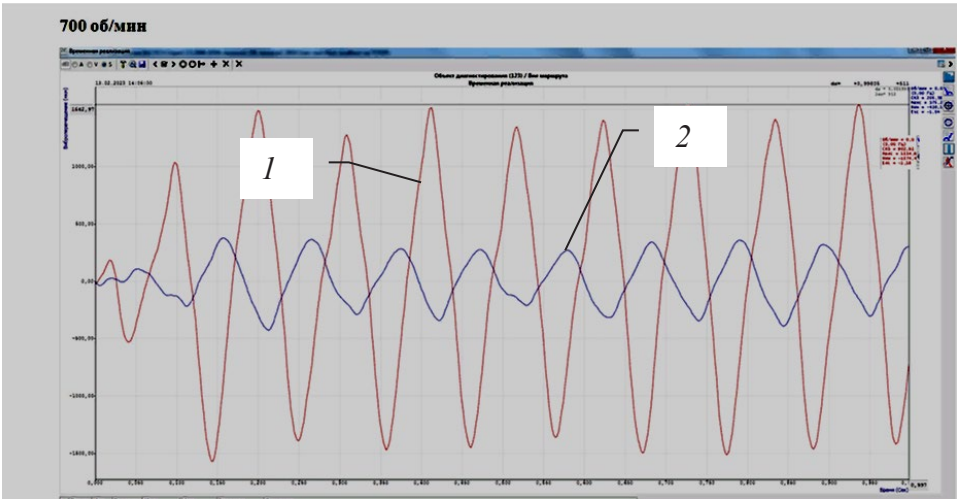


Рисунок 3 – Пример осциллограммы колебаний рабочего органа и дебалансного вибратора:
1 – амплитуда колебаний вибратора; 2 – амплитуда колебаний рабочего органа
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – An example of an oscillogram of vibrations of a working body and a non-balanced vibrator:
1 – The amplitude of vibrations of the vibrator; 2 – the amplitude of vibrations of the working body
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Результаты экспериментов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Experimental results
Source: compiled by the authors.

№	Угловая скорость вибратора, рад/с	Амплитуда колебаний рабочего органа, мм			Математическое ожидание, мм	Дисперсия
	X_k	Y_1	Y_2	Y_3		
1	52	0,13	0,07	0,22	0,14	0,0057
2	61	0,37	0,43	0,3	0,37	0,0085
3	70	0,64	0,6	0,7	0,65	0,0026
4	78	0,8	0,8	0,89	0,83	0,0027
5	87	0,9	0,82	0,97	0,9	0,0057
6	96	1	0,9	1,05	0,98	0,0059
7	104	1	1,1	1	1,03	0,0034
8	113	1	1,06	0,95	1	0,003
Итого:					0,74	0,038

Здесь X_k – угловая скорость вибратора, рад/с;
 Y_i – амплитуда колебаний рабочего органа, мм.

Критерий Кохрена:

$$G = \frac{S_{k\max}^2}{S_{\Sigma}^2} = \frac{0,0085}{0,038} = 0,22.$$

Табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha=0,05$ и степени свободы $f=2$ составляет $G_{\text{табл}}=0,87$. Условие $G < G_{\text{табл}}$ выполняется – эксперимент воспроизводим.

Аналогичные результаты получены при статистической обработке амплитуды колебаний вибратора.

По результатам экспериментов на физической модели получены зависимости амплитуды колебаний рабочего органа и дебалансного вибратора от угловой скорости вибратора (рисунк 4).

Из графика следует, что представленные зависимости амплитуд, полученных на математической и физической модели, качествен-

но повторяют друг друга. В исследованном диапазоне изменения частоты вынуждающей силы максимальная ошибка составляет 12%. Это подтверждает результаты, полученные на математической модели резонансного вибрационного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теории подобия процессов, протекающих в системе резонансного вибрационного оборудования, разработанных критериев предложены формулы перехода от параметров натуры к параметрам физической модели.

Исследования, выполненные на физической модели резонансного вибрационного оборудования, подтверждают результаты математического моделирования. Максимальная ошибка составляет 12%.

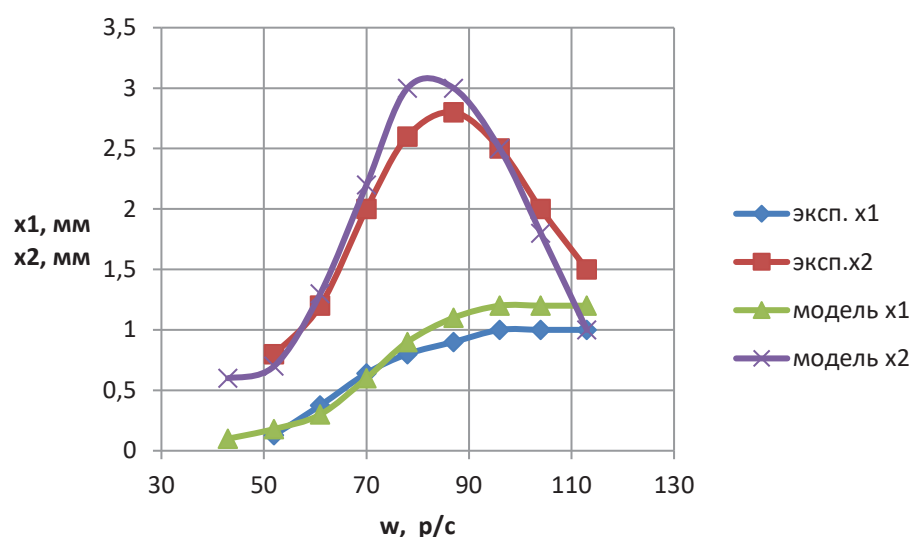


Рисунок 4 – Сравнение результатов экспериментальных и имитационных исследований
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Comparison of the results of experimental and simulation studies
Source: compiled by the authors.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новосельцев В.Н. Достоинства и недостатки математического моделирования // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 121–122.
2. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики // iPolytech Journal. 2022. Т. 26, № 2. С. 164–172.
3. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Типоразмерный ряд резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей и методика расчета его основных параметров // Вестник СибАДИ. 2023; 20(5): 540–547. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>. EDN: CHGYRA
4. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Влияние точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе на ее энергоэффективность // Вестник СибАДИ. 2023; 20(1): 12–23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>
5. Сайтов В.И., Чупров В.В. Критерии подобия процесса дробления горных пород несвободным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 3. С. 351–353.
6. Тургунбаев М.С. Критерии подобия процесса разрушения грунта, содержащего обломочно-каменное включение // Известия вузов Кыргызстана. 2016. № 11–1. С. 47–51.
7. Сайтов В.И. Условия подобия процессов разрушения горных пород при дроблении // Известия вузов. 1986. № 10. С. 59–63.
8. Соболева Н.С., Ефремов А.К. О подобии процессов при упругопластическом ударе // Машиностроение и компьютерные технологии. 2019. № 2. С. 1–12.
9. Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н. Критерии подобия гидродинамических моделей вибрирующего слоя сыпучего материала // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2005. № 1(17). С. 105–108.
10. Пирожков Д.Н. Критерии подобия в динамике вибрирующего слоя // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2003. № 4(12). С. 100–103.
11. Недоступ А.А. Критерии и масштабы динамического подобия физических процессов рыболовства // Известия КГТУ. 2013. № 28. С. 227–235.
12. Козлов И.В., Пещеренко С.Н. Критерии подобия лопастных насосов // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 3. С. 5–11.
13. Сайтов В.И. Условия подобия процессов разрушения горных пород при дроблении и измельчении // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 1(110). С. 25–28.
14. Тюкалов Д.Е., Данилов А.М. Формирование критериев динамического подобия модели реальному объекту // Молодой ученый. 2015. № 4(84). С. 278–280.
15. Нешев С.С., Молчанов В.Ф., Сальников А.Ф. Применение теории подобия при проектировании РДТТ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2012. № 33. С. 66–76.

16. Кошкин С.В., Соколов А.Л. Обработка и анализ результатов эксперимента и проверка гипотез // Специальная техника и технологии транспорта. 2020. № 5. С. 280–285.

REFERENCES

1. Novoseltsev V.N. Advantages and disadvantages of mathematical modeling. *Fundamental Research*. 2004; 6: 121–122. (in Russ.)
2. Zedgenizov V.G., Fayzov S.H. Influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics. *iPolytech Journal*. 2022; 26(2): 164–172. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-164-172>
3. Zedgenizov V.G., Faizov S.Kh. Type series of resonant vibration equipment for concrete mixtures compaction and its main parameters calculation method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(5): 540–547. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>. EDN: CHGYRA
4. Zedgenizov V.G., Faizov S.Kh. Impact of force application point in two-mass oscillation system on its energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(1): 12–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>
5. Saitov V.I., Chuprov V.V. Criteria for the similarity of the process of crushing rocks by a non-free blow. *Mining informational and analytical bulletin*. 2006; 3: 351–353. (in Russ.)
6. Turgunbaev M.S. Criteria for the similarity of the process of destruction of soil containing clastic-stone inclusions. *Izvestiya VUZov Kyrgyzstana*. 2016; 11-1: 47–51. (in Russ.)
7. Saitov, V. I. Conditions for the similarity of rock destruction processes during crushing. *Izv. University*. 1986; 10: 59–63. (in Russ.)
8. Soboleva N.S., Efremov A.K. On the similarity of processes during elastoplastic impact. *Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii*. 2019; 2: 1–12. (in Russ.)
9. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. Similarity criteria of hydrodynamic models of a vibrating boiling layer of bulk material. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2005; 1(17): 105–108. (in Russ.)
10. Pirozhkov D.N. Similarity criteria in the dynamics of the vibrating boiling layer. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2003; 4(12): 100–103. (in Russ.)
11. Nedostup A.A. Criteria and scales of dynamic similarity of physical processes of fishing. *Izvestiya KGTU*. 2013; 28: 227–235.
12. Kozlov I.V., Peverenko S.N. Criteria of similarity of vane pumps. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika*. 2019; 3: 5–11. (in Russ.)
13. Saitov V.I. Conditions of similarity of processes of rock destruction during crushing and grinding. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2015; 1(110): 25–28. (in Russ.)

14. Tyukalov D.E., Danilov A.M. Formation of criteria for dynamic similarity of a model to a real object. *Molodoj uchenyj*. 2015; 4(84): 278–280. (in Russ.)

15. Neshev S.S., Molchanov V.F., Salnikov A.F. Application of the theory of similarity in the design of RDTT. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2012; 33: 66–76. (in Russ.)

16. Koshkin S.V., Sokolov A.L. Processing and analysis of experimental results and hypothesis testing. *Special'naja tehnika i tehnologii transporta*. 2020; 5: 280–285. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Зедгенизов В.Г. Разработаны критерии и индикаторы подобия процессов, протекающих в системе резонансного вибрационного оборудования, предложены формулы перехода от параметров натуры к параметрам физической модели, общие выводы по работе.

Файзов С.Х. Проведение экспериментальных исследований, статистическая обработка данных, общие выводы по работе.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zedgenizov V.G. Criteria and indicators of similarity of processes occurring in the system of resonant vibration equipment development, formulas for the transition from the parameters of nature to the parameters of the physical model statement, general conclusions of the work.

Faizov S.K. Experimental research, statistical data processing, general conclusions of the work.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5141-0876>, **SPIN-код:** 9565-419, e-mail: vzedgenizov@bk.ru

Файзов Сорбон Хотамович – аспирант кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4428-9999>, e-mail: sorbon2018@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontova str.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5141-0876>, **SPIN-cod:** 9565-419, e-mail: vzedgenizov@bk.ru

Sorbon Kh. Faizov – Postgraduate student of the of Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontova str.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4428-9999>, e-mail: sorbon2018@mail.ru

Научная статья

УДК 621.866-82

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387>

EDN: PGRDGO



АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАТФОРМ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Ф.Р. Крупенин ✉, Е.В. Куракина

Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),

г. Санкт-Петербурга, Россия

✉ ответственный автор

theocharicot@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для возведения объектов высотного строительства применяются самоподъемные платформы на основе гидравлического привода, поднимающие опалубку монолитных конструкций. Данные подъемные механизмы различаются по конструктивным особенностям, характеристикам и параметрам. В отрасли возникает необходимость внедрения высокотехнологичных средств. Для создания самоподъемных платформ для высотного строительства необходимо провести исследования в области эксплуатации подъемно-транспортных средств.

Материалы и методы. Для анализа использовались платформы на основе подъемно-переставного профиля. Рассматривались конструктивные особенности указанного типа платформ. В качестве основных параметров были приняты скорость подъема, максимальная высота подъема и грузоподъемность.

Результаты. Для указанного типа платформ получены графические данные об основных конструктивных элементах и процессе подъема. Приводятся графические данные о гидравлической системе, и детально рассматривается механизм перемещения. Выведены основные формулы для определения скорости перемещения платформ и максимальной грузоподъемности, необходимых при выборе указанных подъемно-транспортных средств.

Обсуждение и заключение. Наличие факторов, влияющих на скорость перемещения платформ и их максимальную грузоподъемность, дает основания для разработки метода расчета и проектирования рассматриваемых транспортно-технологических средств на территории Российской Федерации. Одним из путей развития данных подъемно-транспортных средств является интегрирование в их конструкцию вспомогательных механизмов для проведения сопутствующих работ при возведении высотных сооружений, тем самым формируя единый транспортно-технологический комплекс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подъемно-транспортные механизмы, гидравлические машины, гидравлические цилиндры, средства механизации строительства, самоподъемная опалубка, высотное строительство, самоподъемные системы, подъемное оборудование, строительное оборудование

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность Пыригу Константину Николаевичу за помощь в сборе информации о конструктивных особенностях и технических характеристиках самоподъемных платформ, а также рецензентам.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 06.04.2024.

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: Крупенин Ф.Р., Куракина Е.В. Анализ конструкций и параметров самоподъемных платформ и перспективы развития // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 3. С. 376-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387>

© Крупенин Ф.Р., Куракина Е.В., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387>
EDN: PGRDGO

ANALYSIS OF STRUCTURES AND MOVEMENT PARAMETRES OF SELF-CLIMBING PLATFORMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Fedor R. Krupenin ✉, **Elena V. Kurakina**

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia*
✉ *corresponding author*
theoharicot@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. For high-rise building construction self-climbing platforms based on hydraulic drive are used, lifting the formwork for monolithic structures. These lifting mechanisms differ in structures, characteristics and parameters. There is a need to introduce high-tech equipment in the industry. To create self-climbing platforms for high-rise construction, it is necessary to conduct research in the field of operation of lifting vehicles.

Materials and methods. Platforms based on climbing profile for the analysis were used. The design features of the specified type of platforms were considered. The main parameters were speed of lifting, maximum lifting height and load capacity.

Results. Graphical data on the main structural elements and the lifting process were obtained the specified type of platforms. Graphical data on hydraulic system is provided and the mechanism of movement is considered in detail. The basic formulas for determining the platform lifting speed and maximum load capacity required for the choosing of specified lifting vehicles.

Discussion and conclusion. Existence of factors affecting the lifting speed of platforms and their maximum load capacity provides grounds for the development of a method for calculating and designing the considered transport and technological equipment in Russian Federation. One of the ways to develop this lifting equipment is integration of accessory mechanisms into their structure for fulfilling additional works during the construction of high-rise buildings, in this way forming a single transport and technological complex.

KEYWORDS: materials-handling machines, hydraulic engine, hydraulic cylinder, mechanical equipment for construction, self-climbing formwork, high-rise construction, self-climbing systems, construction equipment

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors are grateful to Konstantin Nikolayevich Pyrig for his help in collecting information on the design features and technical characteristics of jack-up platforms, and to the reviewers.

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Krupenin F.R., Kurakina E.V. Analysis of structures and movement parametres of self-climbing platforms and development prospects. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 376-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-376-387>

© Krupenin F.R., Kurakina E.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В современном высотном строительстве все большее внимание уделяется разработке и применению инновационных технологий, в частности, введению новых средств механизации, позволяющих снизить трудоемкость работ, сократить сроки возведения сооружения и повысить экономическую эффективность проекта [1, 2]. Большинство высотных зданий в мире возводится с применением средств механизации опалубочных работ на основе гидравлического привода [3]. Одним из таких наиболее эффективных подъемно-транспортных средств являются самоподъемные гидравлические платформы.

Самоподъемная гидравлическая платформа – это технически сложная система, применяемая для перемещения на следующий этап ведения работ строительного оборудования – опалубки монолитных конструкций ядра жесткости высотного здания без её отсоединения от платформы и без использования крана. Кроме того, конструкции данной платформы могут использоваться как временные площадки складирования строительного инвентаря, а также с них могут вестись работы по армированию и бетонированию монолитных конструкций. Данное подъемно-транспортное средство представляет собой комплексную систему, состоящую из стальных пространственных конструкций каркаса платформы и подъемной гидравлической системы, в которой механизм подъема может быть выполнен либо на основе подъемно-переставного профиля с использованием гидравлических цилиндров малой грузоподъемности, либо на основе цилиндров высокой грузоподъемности с их непосредственной интеграцией в конструкцию платформы. Использование данных транспортно-технологических средств позволяет повысить технико-экономические показатели строительного проекта за счет снижения затрат кранового времени и уменьшения количества выполняемых операций, связанных с возведением монолитных конструкций [4, 5].

С точки зрения определения самоподъемную гидравлическую платформу можно классифицировать как опалубку с шахтным подъемником, опираясь на ГОСТ Р 52086–2003. Однако, поскольку данная система имеет в своем составе шахтный подъемник с гидравлическим приводом, то, согласно

ГОСТ 33558.1–2015, её можно отнести к строительным подъемникам – подъемным машинам с установленными на них грузоподъемными механизмами. Таким образом, самоподъемная платформа является грузоподъемной машиной с объемным гидравлическим приводом, способной перемещать полезный груз в пределах этапа работ возводимого здания, одновременно позволяя своей конструкции передвигаться вертикально вверх по мере возведения строительного объекта¹.

Анализ современных источников показывает, что данная тема является малоизученной с точки зрения определения и расчета основных параметров перемещения данных платформ, а именно скорости перемещения платформ, максимальной высоты подъема и предельной грузоподъемности, а также факторов, влияющих на данные параметры. Более того, остаются нерешенные вопросы в методах расчета и проектирования указанных подъемно-транспортных средств, в частности, сборе и приложении нагрузок к конструкциям платформ и в выборе основных расчетных комбинаций, которые должны соответствовать требованиям обеспечения безопасной эксплуатации на территории Российской Федерации. В дополнение к вышеперечисленному остается ряд задач, связанных с подбором гидравлического оборудования, необходимого для вертикального передвижения данных систем по мере возведения строительного объекта.

Важно учитывать факторы, влияющие на скорость возведения здания при использовании самоподъемной системы опалубки на основе гидравлической платформы:

- конструктивный фактор;
- фактор обученности персонала;
- фактор погодных условий [6].

При этом отсутствуют данные о факторах, влияющих непосредственно на скорость перемещения самой гидравлической платформы. Существуют зарубежные исследования различных типов самоподъемных систем, не включающих исследования рассматриваемых платформ, при действии различных типов нагрузок, в частности, при воздействии статической нагрузки [7]. Вместе с тем важным условием применения самоподъемных систем является их способность противостоять динамическим нагрузкам – ветровым и сейсмическим, что немаловажно, поскольку данные

¹ Наземные транспортно-технологические машины и комплексы: учебник для вузов / С.А. Евтюков, С.С. Евтюков, А.В. Чудаков, Е.В. Куракина. Санкт-Петербург: ИД «Петрополис», 2017. 644 с

системы применяются на значительной высоте и в различных регионах ведения работ [8, 9, 10]. Кроме того, так как элементы рассматриваемых подъемно-транспортных механизмов используются постоянно – на различных проектах и при разных условиях, их прочность является главным условием безопасной эксплуатации [11].

Одним из направлений развития самоподъемных систем является применение новых материалов и конструкций, облегчающих вес системы, повышая тем самым максимальную грузоподъемность подъемного механизма [12]. Нельзя не упомянуть, что проектирование данных подъемно-транспортных средств необходимо рассматривать с учетом характеристик высотных зданий [13]. Стоит также отметить, что специалистами из КНР был проведен ряд исследований непосредственно самоподъемных платформ, включающих расчет конструкции при запаздывании подъема одного из гидравлических цилиндров [14]. Отдельно нужно сказать, что одной из современных гидравлических платформ является так называемая High-Rise Building Machine (с англ. машина для высотного строительства), разработанная специалистами из КНР, которая, помимо собственного веса и веса полезного груза, может также включать в себя дополнительные подъемно-транспортные машины, такие как интегрированные в систему краны [15, 16].

Однако, чем более технологичным и функциональным становится механизм, тем больше он нуждается в современных средствах контроля за различными параметрами, такими как датчики контроля положения машины в процессе работы и средствами контроля равномерности перемещения [17]. Помимо введения в систему средств контроля и управления, важным аспектом является автоматизация работы данных платформ, которая положительным образом сказывается на их эффективности использования [18]. Введение указанных средств в систему гидравлического привода также является перспективным направлением развития самоподъемных платформ, поскольку позволяет контролировать процесс подъема, избегая непредвиденных ситуаций в случае внезапного отказа оборудования.² Тем не менее основным фактором, влияющим на качество и безопасность работ, остается следование инструкциям по эксплуатации и со-

блюдение техники безопасности при работе с вышеперечисленными подъемно-транспортными механизмами [19].

В связи с вышеизложенным данная научная статья посвящена анализу конструкций и параметров перемещения самоподъемных гидравлических платформ для возведения высотных зданий. В данной работе рассматриваются самоподъемные платформы на основе подъемно-переставного профиля (Тип 1), поскольку для анализа платформ с интегрированными гидроцилиндрами (Тип 2) и сравнительного анализа указанных типов требуется проведение дополнительного исследования. Актуальность проблемы исследования также объясняется ограничением на импорт технологий и оборудования из западных стран, сравнительный анализ конструкций и параметров перемещения самоподъемных платформ для возведения высотных зданий становится особенно важным для создания альтернативных подъемно-транспортных средств для высотного строительства на территории Российской Федерации и определения новых подходов к решению технических задач.

Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи:

- анализ конструкций самоподъемных платформ на основе подъемно-переставного профиля;
- исследование параметров и принципов работы платформ указанного типа;
- исследование технических характеристик самоподъемных платформ, включая грузоподъемность, высоту подъема и скорость перемещения; оценка преимуществ и недостатков рассмотренного типа платформ.

Результаты данного исследования важны для инженеров, занимающихся проектированием современных механизированных грузоподъемных средств для высотного строительства, а также для работников строительной отрасли, их эксплуатирующих. Полученные результаты могут способствовать созданию отечественных транспортно-технологических комплексов для высотного строительства, обеспечивающих потребности отрасли, что приведет к применению более эффективных и безопасных конструкций самоподъемных платформ, повышающих производительность и снижающих затраты при возведении высотных сооружений.

² Сысоев А.В. Совершенствование технологии монолитного домостроения на основе методов и средств автоматизации опалубочных работ: дис... канд. техн. наук: 05.23.08. Нижний Новгород, 2006. 167 с

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Самоподъемные гидравлические платформы представляют собой жесткую пространственную конструкцию, состоящую из верхней платформы, к которой крепится перемещаемая опалубка и на которой может располагаться дополнительный полезный груз, вертикальных несущих элементов, поддерживающих платформу, и горизонтальных элементов крепления платформы к возводимому зданию, также выполняющих функцию опорных элементов в ходе процесса перемещения всего транспортного средства. В качестве силового привода используется гидравлическая система, включающая в себя гидравлический агрегат, магистральные линии, непосредственно гидравлические цилиндры подъема, а также элементы, такие как подъемно-переставные профили и рычажные стопорные механизмы или специальные детали, служащие для соединения конструкции платформы с гидравлическим приводом и создания подъемно-транспортного средства.

Для сравнительного анализа рассмотрены самоподъемные гидравлические платформы DOKA, а именно самоподъемная платформа Типа 1: SKE100 plus (Selbstklettereinheit – с нем. самоподъемный элемент) с системой ги-

дравлического привода на базе подъемно-переставного профиля.

Выполнен систематический сбор данных по рассматриваемому типу подъемно-транспортных средств с целью выявления их конструктивных особенностей и параметров перемещения, таких как максимальная высота подъема и грузоподъемность, а также для определения их скорости перемещения и факторов, способных повлиять на равномерность подъема. Приведены формулы расчета скорости подъема, на основании которых рассчитывается производительность грузоподъемного механизма.

Дано графическое представление о конструкции, силовом приводе и процессе эксплуатации данных подъемно-транспортных средств, в частности, для процесса перемещения. Представлены основные схемы рассматриваемых механизмов, показаны их конструктивные особенности.

Полученные данные проанализированы на предмет определения достоинств и недостатков рассматриваемого типа самоподъемных платформ с целью выявления направлений их развития и усовершенствования, которые способствуют проектированию и производству новых транспортно-технологических средств для высотного строительства.

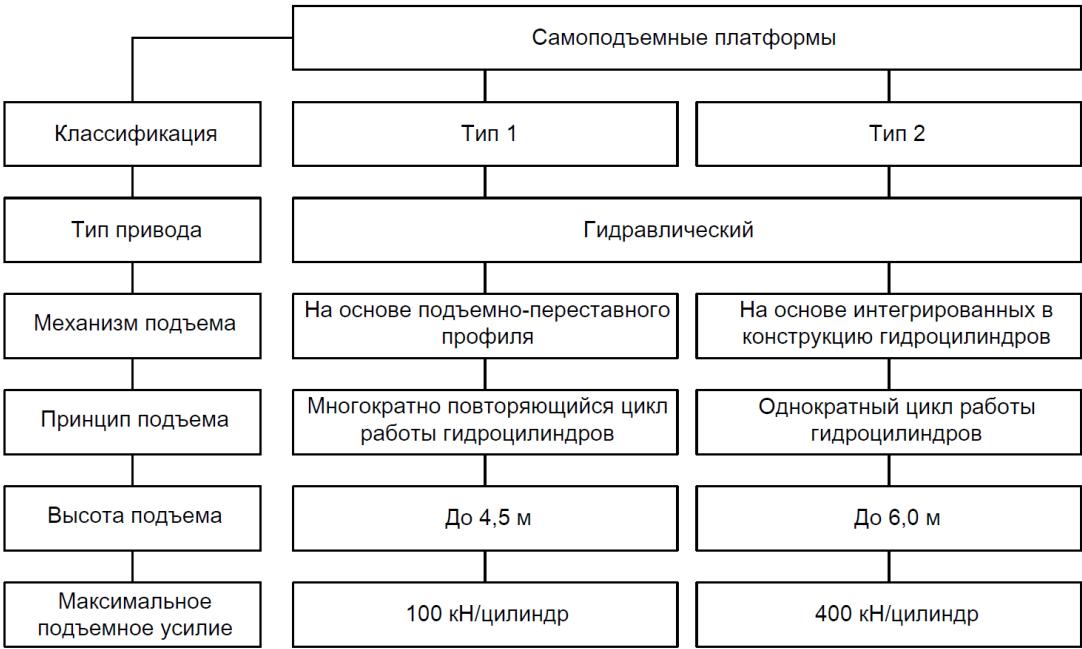


Рисунок 1 – Классификация самоподъемных платформ
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Self-climbing platforms classification
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Самоподъемные платформы для высотного строительства подразделяются на два типа:

- с механизмом перемещения на основе подъемно-переставного профиля (Тип 1);
- с интегрированными в конструкцию платформы гидроцилиндрами (Тип 2).

Данные типы различаются по конструктив-

ным особенностям, механизмам и принципам подъема, параметрам перемещения, а именно скорости, а также по основным характеристикам, таким как максимальная высота подъема и общая грузоподъемность платформы. Классификация рассматриваемых подъемно-транспортных средств приведена в виде схемы на рисунке 1.

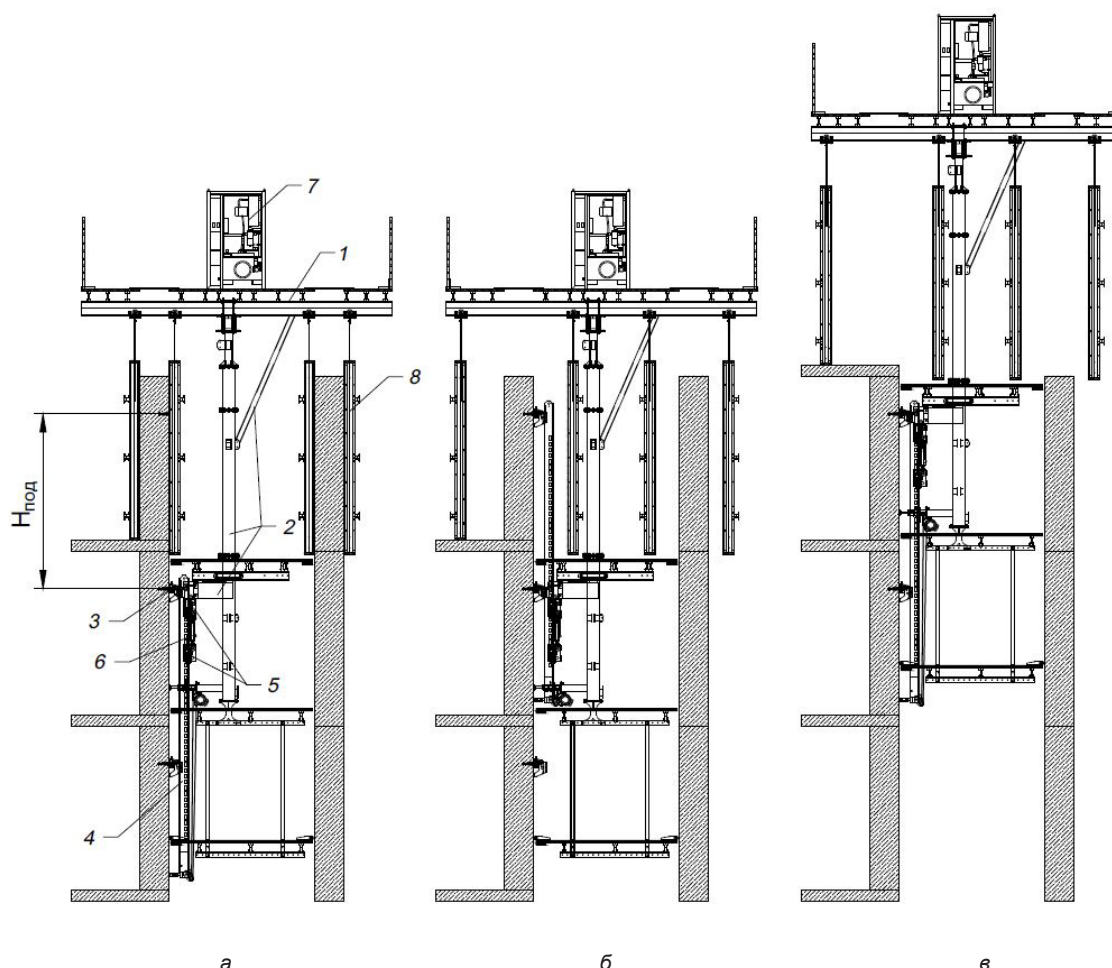


Рисунок 2 – Общий вид и порядок подъема платформы Типа 1:
 а – общий вид; б – вертикальное перемещение подъемно-переставного профиля;
 в – вертикальное перемещение конструкций платформы;
 1 – стальной каркас платформы;
 2 – вертикальные конструкции платформы;
 3 – опорный элемент и закладная деталь в бетонных конструкциях;
 4 – подъемно-переставной профиль; 5 – подъемные механизмы;
 6 – гидроцилиндр; 7 – гидравлический агрегат;
 8 – подвешиваемый груз-опалубка; $H_{\text{под}}$ – высота подъема платформы
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – General view and order of climbing platform Type 1:
 а – general view; б – lifting of climbing profile;
 в – lifting of the platform; 1 – steel gantry;
 2 – vertical units of platform; 3 – suspension element with anchor point;
 4 – climbing profile; 5 – lifting mechanisms; 6 – hydraulic cylinder;
 7 – hydraulic unit; 8 – suspended load-formwork;
 $H_{\text{под}}$ – height of the platform lifting;
 Source: compiled by the authors.

САМОПОДЪЕМНЫЕ ПЛАТФОРМЫ ТИПА 1

Принцип подъема данных платформ 1 заключается в перемещении подъемно-переставного профиля от исходной точки до следующей точки крепления, устроенной в забетонированных конструкциях, и последующем перемещении вертикальных конструкций и самой платформы на следующий этап ведения работ (рисунок 2). Полезный груз, в данном случае опалубка, крепится непосредственно к каркасу платформы, и перемещается совместно с ней, тем самым снижая затраты на использование кранового времени по транспортировке опалубки с уровня земли на рабочий горизонт и уменьшая трудоемкость по ведению бетонных работ, в частности, работ по опалубливанию монолитных конструкций. Данное преимущество рассматриваемых подъемно-транспортных средств является особенно важным при ведении работ на значительной высоте.

Подъем указанной платформы осуществляется посредством системы объемного гидравлического привода, интегрированного в её конструкцию. Гидравлическая система (рисунок 3) выполнена по замкнутому принципу и состоит из гидравлического агрегата, включающего в себя: масляной бак, гидравлический насос, фильтры, манометры, индикаторы работы гидроагрегата и клапаны; напорной и сливной гидравлических линий, образующих кольцевой трубопровод; гидравлических делителей потока на обе линии, представляющих из себя полые элементы без элементов регулирования расхода, через которые проходят рабочие линии от гидроагрегата и из которых выходят магистрали, идущие непосредственно в поршневые и штоковые полости силовых гидроцилиндров двустороннего действия. Верхняя серьга цилиндра через специальный подъемный механизм соединена с вертикальными конструкциями платформы, нижняя серьга, расположенная на штоке, также через подъемный механизм соединена с подъемно-переставным профилем, в котором имеются отверстия для зацепления со стопором подъемного механизма. Длина выдвижения штока гидроцилиндра составляет 300 мм.

Так как в делителях потока отсутствуют элементы регулирования расхода рабочей жидкости, то при различных нагрузках, приходящихся на шток цилиндра, скорость выдвижения штоков будет различной. Единственным элементом регулирования расхода являются шаровые краны, установленные на гидроцилиндрах в точке входа напорной линии в поршневую полость.

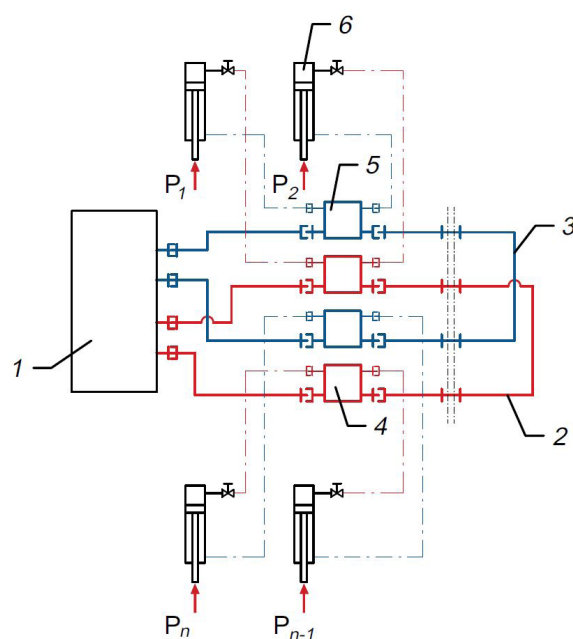


Рисунок 3 – Гидравлическая схема платформы Типа 1:
1 – гидравлический агрегат; 2 – напорная магистраль;
3 – сливная магистраль;
4 – делитель потока напорной линии;
5 – делитель потока сливной линии; 6 – гидроцилиндр;
 $P_1, \dots, P_n$ – усилия на штоках цилиндров
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Hydraulic circuit of platform Type 1:
1 – hydraulic unit; 2 – pressure line;
3 – return line; 4 – pressure line distributor;
5 – return line distributor; 6 – hydraulic cylinder;
 $P_1, \dots, P_n$ – forces on cylinder rods;
Source: compiled by the authors.

Подъем профиля (рисунок 4, а) производится при верхнем положении рычага стопора. В данном положении рычага стопор зацепляется с верхней гранью отверстия на подъемно-переставном профиле. При подаче рабочей жидкости в поршневую полость цилиндра шток начинает двигаться вниз, пока не достигнет верхней грани отверстия, находящегося на расстоянии не более длины выдвижения штока, в данном случае 240 мм, поскольку шаг прорезей равен 120 мм. Верхний подъемный механизм остается неподвижным, поскольку он соединен с платформой, которая закреплена на забетонированных конструкциях, иначе говоря, платформа служит опорной точкой для подъема профиля. После зацепления стопора нижнего подъемного механизма с верхней гранью отверстия производится переключение подачи рабочей жидкости в штоковую полость цилиндра. Шток начинает перемещаться вверх, поднимая за счет стопорного механизма профиль.

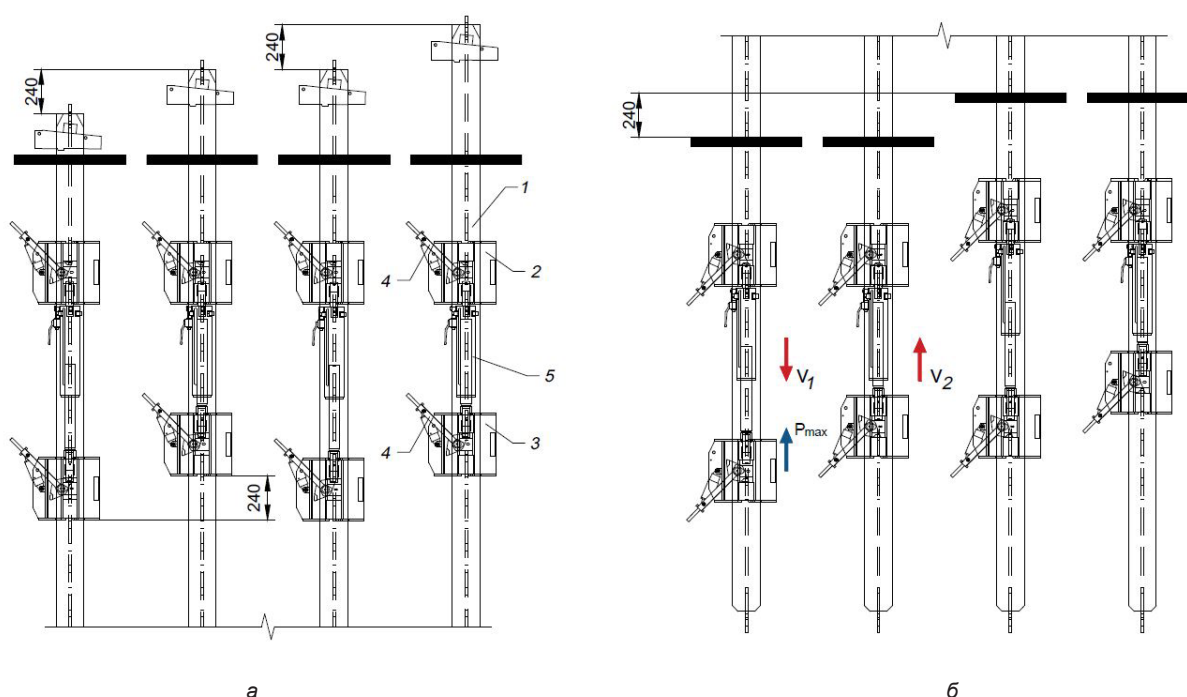


Рисунок 4 – Процесс подъема платформы Типа 1:
 а – подъем направляющего профиля; б – подъем платформы;
 1 – подъемно-переставной профиль; 2 – верхний подъемный механизм;
 3 – нижний подъемный механизм;
 4 – стопор с рычагом; 5 – гидроцилиндр;
 V_1 – скорость выдвижения штока самого нагруженного цилиндра;
 V_2 – скорость втягивания штока самого нагруженного цилиндра;
 P_{max} – усилие на штоке самого нагруженного цилиндра
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Climbing process of platform Type 1:
 а – lifting of profile; б – lifting of platform;
 1 – climbing profile; 2 – upper lifting mechanism;
 3 – lower lifting mechanism; 4 – stopper with lever; 5 – hydraulic cylinder;
 V_1 – extension rod speed of the most loaded cylinder;
 V_2 – retraction rod speed of the most loaded cylinder;
 P_{max} – force on the rod of the most loaded cylinder;
 Source: compiled by the authors.

Стопор верхнего механизма зацепляется с верхней гранью отверстия профиля, которое переместилось на указанное расстояние, тем самым удерживая его от перемещения вниз. Далее цикл работы гидроцилиндра повторяется, пока подъемно-переставной профиль не достигнет следующей по высоте точки крепления платформы.

Подъем конструкций самой платформы (рисунок 4, б) происходит по аналогичному принципу, однако для данной операции рычаг стопорного механизма переводится в нижнее положение. В этом случае зацепление стопора с профилем происходит по нижней грани отверстия, а сам подъемный профиль и нижний механизм в момент подъема становятся опорной точкой для цилиндра. При движении штока цилиндра вниз происходит перемеще-

ние платформы вверх, до зацепления стопора верхнего механизма с гранью следующего отверстия. Когда платформа через стопорный механизм закрепляется на профиле, происходит переключение подачи жидкости в штоковую полость цилиндра, и шток начинает двигаться вверх до зацепления с нижней гранью следующего отверстия. Цикл работы гидроцилиндра повторяется, пока платформа не достигнет следующей точки закрепления.

Для определения скорости перемещения самоподъемной платформы Типа 1 рассмотрена скорость перемещения самой платформы, без учета скорости перемещения подъемно-переставного профиля (см. рисунок 4, б). Поскольку рассматриваемая платформа представляет собой объемную пространственную конструкцию, то нагрузка, действующая на

штоки цилиндров, будет различной. Дополнительно из-за износа цилиндров, а также их исполнения при выдвигании штока в цилиндрах будут возникать различные силы трения. Как было указано ранее, в делителях потока, установленных на рабочих магистралях, отсутствуют элементы регулирования расхода рабочей жидкости, и вследствие данного факта средняя скорость подъема платформы будет зависеть от скорости выдвигания штока самого нагруженного цилиндра, поскольку его шток будет двигаться медленнее остальных.

Высота подъема платформы зависит от длины используемого подъемно-переставного профиля, а также от условий строительного объекта, чаще всего высота подъема равна высоте этажа возводимого здания, однако в некоторых ситуациях, при нетиповых конструктивных решениях здания, данная высота может изменяться, иначе говоря, высота подъема платформы равна расстоянию между точками крепления платформы к монолитным конструкциям.

Средняя скорость перемещения платформы Типа 1, с,

$$v_{\text{ср}} = \frac{H_{\text{под}}}{T_{\text{под}}},$$

где $H_{\text{под}}$ – высота подъема, мм; $T_{\text{под}}$ – общее время подъема платформы, с.

$$T_{\text{под}} = n_{\text{цикл}} \times t_{\text{ц}},$$

где $n_{\text{цикл}}$ – количество циклов работы цилиндров; $t_{\text{ц}}$ – время одного цикла работы самого нагруженного цилиндра, с.

$$n_{\text{цикл}} = \frac{H_{\text{под}}}{240},$$

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{п}} \times \left(\frac{240}{v_1} + \frac{240}{v_2} + t_{\text{п}} \right),$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий потери времени на выравнивание платформы вследствие неравномерности подъема ($k_{\text{п}} > 1$); v_1 – скорость выдвигания штока самого нагруженного цилиндра, мм/с; v_2 – скорость втягивания штока самого нагруженного цилиндра, мм/с; $t_{\text{п}}$ – время, затрачиваемое на переключение подачи рабочей жидкости в поршневую или штоковую полость цилиндра.

Значения нагрузок на шток гидравлического цилиндра можно получить, используя метод конечных элементов, создав простран-

ственную расчетную модель платформы. Зная нагрузки на шток цилиндра, а также характеристики гидравлического агрегата, напорных магистралей и самих цилиндров, можно найти значения скоростей v_1 и v_2 .

Как видно из приведенных формул, на среднюю скорость подъема платформы оказывает влияние неравномерность нагружения цилиндров гидравлического привода. Кроме того, неравномерность подъема может оказать влияние и на конструкцию самой платформы, поскольку при разной скорости хода штоков цилиндров происходит перераспределение напряжений в несущих конструкциях, что может привести к аварийным ситуациям. Также вследствие неравномерного хода штоков цилиндров, перераспределение усилий может вызвать разрушение опорной бетонной поверхности, к которой крепятся конструкции платформы.

Данный недостаток можно решить, введя в систему элементы регулирования расхода рабочей жидкости. Дополнительно, в целях автоматизации системы, можно ввести элементы контроля и управления за подъемом, позволяющие отслеживать положение платформы в данный промежуток времени, тем самым снизив количество рабочего персонала, требуемого для проведения процесса перемещения, так как контроль за подъемом платформы осуществляется только визуально силами работников строительного объекта.

Максимальное подъемное усилие, которое способен развить один цилиндр системы SKE100 plus, составляет 100 кН. Максимальная теоретическая грузоподъемность всей платформы, Кн:

$$G_{\text{max}} = k_{\text{н}} \times n_{\text{цил}} \times P_{\text{ц}} - G_{\text{св}},$$

где $k_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность нагружения цилиндров вследствие перераспределения усилий в пространственной конструкции платформы ($k_{\text{н}} < 1$); $n_{\text{цил}}$ – количество цилиндров, используемых для перемещения самоподъемной платформы; $P_{\text{ц}}$ – максимальное подъемное усилие, которое способен развить один цилиндр, кН; $G_{\text{св}}$ – собственный вес самоподъемной платформы, кН.

Фактическую грузоподъемность платформы можно также определить, используя метод конечных элементов, где в пространственной расчетной схеме штоки цилиндров будут являться опорами конструкции платформы. Условием подъема платформы будет являться значение реакции на опоре меньше максимального подъемного усилия цилиндра.

Исходя из приведенной формулы видно, что на максимальную грузоподъемность системы также влияет неравномерность нагружения гидроцилиндров, участвующих в процессе подъема. Соответственно, важным аспектом при проектировании транспортно-технологических средств такого типа является распределение цилиндров по поверхности платформы таким образом, чтобы усилия, которые возникают на штоках цилиндров, были равны или максимально близки по значению между собой.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о влиянии на скорость подъема скорости выдвижения штока самого нагруженного цилиндра. Данная неравномерная загруженность цилиндров учитывается введением коэффициента, увеличивающего время одного цикла из-за остановок движения при подъеме для достижения запаздывающими штоками необходимой длины выдвижения. Дополнительным фактором, влияющим на скорость, является цикличность работы цилиндров при подъеме. В платформах Типа 1 подъем происходит циклично попеременной работой цилиндров, вследствие этого время подъема увеличивается, поскольку оператору необходимо затрачивать время на переключение подачи рабочей жидкости в различные полости цилиндров.

Фактическая грузоподъемность платформ Типа 1 зависит от максимального подъемного усилия, развиваемого одним гидроцилиндром. Однако, как и в случае со скоростью платформы, неравномерная загруженность также влияет на значение грузоподъемности, вследствие чего в формулу вводится понижающий коэффициент.

Важно отметить, что каркас подъемно-транспортных средств представляет собой жесткую пространственную конструкцию, в которой в процессе подъема гидравлические цилиндры играют роль опор. Благодаря этому при проектировании таких средств требуется учитывать пространственную работу их конструкций таким образом, чтобы соблюдалось условие равномерной загруженности гидроцилиндров, поскольку данный фактор влияет как на скорость подъема, так и на грузоподъемность всего подъемно-транспортного средства, иначе говоря, усилия, приходящиеся на цилиндры, должны быть равны или максимально близки между собой по значению.

К недостаткам данных подъемно-транспортных средств следует отнести то, что дан-

ный тип платформ не имеет в своем составе средств контроля и управления, в частности средств регулирования расхода поступающей в цилиндры рабочей жидкости, что вызывает неравномерность движения штоков цилиндров и, как следствие, влияет на скорость подъема платформы. Также в целях упрощения процесса подъема и снижения количества работников, участвующих в процессе подъема, в рассматриваемые средства стоит вводить датчики контроля положения платформ в каждый конкретный момент времени.

С точки зрения рекомендаций при проектировании такого рода транспортно-технологических средств следует отметить следующие аспекты:

1. Оптимальное проектирование данных подъемно-транспортных средств должно проводиться исходя из условия равномерной загруженности цилиндров гидравлического привода.

2. Для оптимальной работы данных подъемно-транспортных средств в них необходимо включать различные средства автоматизации, такие как датчики регулирования расхода рабочей жидкости и датчики положения платформы.

3. Одним из возможных путей развития рассматриваемых платформ является введение в их систему дополнительных технологических средств, среди которых могут быть самоподъемные краны, манипуляторы различного рода и интегрированные в систему бетонораздаточные стрелы, образующие единый транспортно-технологический комплекс для возведения объектов высотного строительства.

В заключение важно отметить, что проектирование и производство самоподъемных платформ либо транспортно-технологических комплексов на их основе является технически сложным процессом, при котором необходимо учитывать аспекты из области строительного машиностроения и строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хряпченкова И.Н., Зотов Д.С. Сравнение автоматизированных опалубочных систем, применяемых для возведения ядер жесткости высотных зданий // STUDNET.2021. №4(6). С. 2096–2109.
2. Жорник М.А., Гамаюнова О.С. Высокоростное строительство высотных зданий // Высокие технологии в строительном комплексе. 2021. № 1. С. 115–123.
3. Aldred J. (2010). Burj Khalifa – A new high for high- Performance concretej. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, 163(2). <https://doi.org/10.1680/cien.2010.163.2.66>

4. Куракова О. Применение опалубочных систем в высотном строительстве // *E3S Web of Conferences*. 2018. 33. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183303026>
5. Савенко А.А., Михеев Г.В. Технологии гидравлической самоподъемной опалубки при возведении сложных монолитных конструкций // *Современные технологии*. 2022. С. 33–35.
6. Крупенин Ф.Р. Факторы, влияющие на использование самоподъемной опалубки в области высотного строительства // *AlfaBuild*. 2023. №3(28) doi: 10.57728/ALF.28.1
7. Venkat Ramanan R, Ramesh Kannan M. Static Analysis of Climbing Formwork System for High-Rise Building Construction. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020; 8(6). DOI:10.35940/ijrte.D7608.038620
8. Yao G., Guo H., Yang Y., Xiang C., & Robert S. Dynamic Characteristics and Time-History Analysis of Hydraulic Climbing Formwork for Seismic Motions. *Advances in Civil Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2139153>
9. Xia J. W., Yao Y. L., Wu X. S., & Chen Y. H. Calculation and Analysis of hydraulic automatic climbing formwork equipment for super high-rise building construction. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2021; 62(1). <https://doi.org/10.20898/j.iass.2021.003>
10. Hu Shicheng, Li Jun. Analysis of dynamic characteristics of climbing formwork under wind loads. *E3S Web Conf*. 2019. 79. 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197901016>
11. Yao G., Wang Z., & Yang Y. Design and mechanical analysis of hydraulic incremental slipforming platform with sliding frame. *Vibroengineering Procedia*. 2021; 36. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.21903>
12. Hong G. H., & Jung, S. W. Development of auto-climbing formwork system for composite core walls. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2022; 21(2). <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1869022>
13. Zhang K., Wang H., Wang K., Cui J., Chen B., & Li, D. Significant progress in construction equipment of super high-rise building. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2018; 7(3). <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2018.7.3.243>
14. Baitian Wang, Hongjuan Zhao, Qiyu Li, Junjie Sun, D.C. Zhang. Safety Analysis of Formwork System in Core Tube Construction of Super High-rise Building. *Forest Chemicals Review*. July-August 2022: 1521–1543. www.forestchemicalsreview.com
15. Pan X, Zhao T, Li X, Zuo Z, Zong G, Zhang L. Automatic Identification of the Working State of High-Rise Building Machine Based on Machine Learning. *Applied Sciences*. 2023; 13(20): 11411. <https://doi.org/10.3390/app132011411>
16. Dai L., & Liao B. The Research and Application of Innovative High Efficient Construction Technologies in Super High Rise Steel Structure Building. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2014; 3(3): 205–214. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2014.3.3.205>
17. Pan X., Huang J., Zhang Y., Zuo, Z., Zhang L. Prediction of the Posture of High-Rise Building Machine Based on Multivariate Time Series Neural Network Models. *Preprints*. 2024, 2024011591. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1591.v1>
18. Nguyen V.T., Nguyen K.A., & Nguyen V.L. An improvement of a hydraulic self-climbing formwork. *Archive of Mechanical Engineering*. 2019; 66(4). <https://doi.org/10.24425/ame.2019.131419>
19. Liu X., Hu Y., Chen D., & Wang L. Safety control of hydraulic self-climbing formwork in south tower construction of Taizhou Bridge. *Procedia Engineering*. 2012; 45. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.152>

REFERENCES

1. Khryapchenkova i.n., Zotov d.s. Comparison of automated formwork systems used to erect high-rise building hardness cores. *Studnet*. 2021; 4(6): 2096 – 2109. (in Russ.)
2. Zhornik M.A., Gamayunova O.S. High-speed construction of high-rise buildings. High technologies in the construction complex. 2021; 1(2021): 115–123. (In Russ.)
3. Aldred, J. Burj Khalifa – A new high for high-Performance concretej. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*. 2010. 163(2). <https://doi.org/10.1680/cien.2010.163.2.66>
4. Kurakova O. Use of formwork systems in high-rise construction. *E3S Web of Conferences*. 2018. 33. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183303026> (In Russ.)
5. Savenko A.A., Mikheev G.V. Technologies of hydraulic self-climbing formwork in construction of complex monolithic structures. *Sovremennye tehnologii*. 2022: 33–35. (In Russ.)
6. Krupenin F. Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction. *AlfaBuild*. 2023; 28 Article No 2801. doi: 10.57728/ALF.28.1 (In Russ.)
7. Venkat Ramanan R, Ramesh Kannan M. Static Analysis of Climbing Formwork System for High-Rise Building Construction. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020; 8(6). DOI:10.35940/ijrte.D7608.038620
8. Yao G., Guo H., Yang Y., Xiang C., & Robert S. Dynamic Characteristics and Time-History Analysis of Hydraulic Climbing Formwork for Seismic Motions. *Advances in Civil Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2139153>
9. Xia J. W., Yao Y. L., Wu X. S., & Chen Y. H. Calculation and Analysis of hydraulic automatic climbing formwork equipment for super high-rise building construction. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2021; 62(1). <https://doi.org/10.20898/j.iass.2021.003>
10. Hu Shicheng, Li Jun. Analysis of dynamic characteristics of climbing formwork under wind loads. *E3S Web Conf*. 2019. 79. 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197901016>
11. Yao G., Wang Z., & Yang Y. Design and mechanical analysis of hydraulic incremental slipforming

platform with sliding frame. *Vibroengineering Procedia*. 2021; 36. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.21903>

12. Hong G. H., & Jung, S. W. Development of auto-climbing formwork system for composite core walls. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2022; 21(2). <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1869022>

13. Zhang K., Wang H., Wang K., Cui J., Chen B., & Li, D. Significant progress in construction equipment of super high-rise building. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2018; 7(3). <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2018.7.3.243>

14. Baitian Wang, Hongjuan Zhao, Qiyu Li, Junjie Sun, D.C. Zhang. Safety Analysis of Formwork System in Core Tube Construction of Super High-rise Building. *Forest Chemicals Review*. July-August 2022: 1521–1543. www.forestchemicalsreview.com

15. Pan X, Zhao T, Li X, Zuo Z, Zong G, Zhang L. Automatic Identification of the Working State of High-Rise Building Machine Based on Machine Learning. *Applied Sciences*. 2023; 13(20):11411. <https://doi.org/10.3390/app132011411>

16. Dai L., & Liao B. The Research and Application of Innovative High Efficient Construction Technologies in Super High Rise Steel Structure Building. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2014; 3(3): 205–214. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2014.3.3.205>

17. Pan X., Huang J., Zhang Y., Zuo, Z., Zhang L. Prediction of the Posture of High-Rise Building Machine Based on Multivariate Time Series Neural Network Models. *Preprints*. 2024, 2024011591. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1591.v1>

18. Nguyen V.T., Nguyen K.A., & Nguyen V.L. An improvement of a hydraulic self-climbing formwork. *Archive of Mechanical Engineering*. 2019; 66(4). <https://doi.org/10.24425/ame.2019.131419>

19. Liu X., Hu Y., Chen D., & Wang L. Safety control of hydraulic self-climbing formwork in south tower construction of Taizhou Bridge. *Procedia Engineering*. 2012; 45. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.152>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Крупенин Ф.Р. Формирование цели научного исследования. Анализ конструкций и параметров перемещения рассматриваемого грузоподъемного оборудования. Анализ состояния вопроса. Обзор предшествующих исследований. Получение данных для анализа и подготовка материалов для статьи.

Куракина Е.В. Руководство темой исследования. Формирование целей и задач исследования. Разработка научной концепции.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Krupenin F.R. Statement of the purpose of scientific research. Analysis of the structures and movement parameters of the considered lifting equipment. Analysis of the status of the issue. A review of previous research. Obtaining data for analysis and preparing materials for the article.

Kurakina E.V. Management of the research topic. Statement of research purposes and tasks. Development of a scientific concept.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крупенин Федор Романович – аспирант кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6785-1366>, **SPIN-код:** 4257-0412, e-mail: theoharicot@yandex.ru

Куракина Елена Владимировна – д-р техн. наук, доц., заведующая кафедрой наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0228-9111>, **SPIN-код:** 1437-4573, e-mail: elvl_86@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Fedor R. Krupenin – Postgraduate of the Land Transport and Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4190005), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6785-1366>, **SPIN-cod:** 4257-0412, e-mail: theoharicot@yandex.ru

Elena V. Kurakina – Associate Professor, Dr of Science, Head of the Land Transport and Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4190005), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0228-9111>, **SPIN-код:** 1437-4573, e-mail: elvl_86@mail.ru

Научная статья

УДК 625.084

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

EDN: HQAJCW



МЕТОД РАСЧЕТА ФАЗОВОГО УГЛА МЕЖДУ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛОЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАЛЬЦА

Е.А. Шишкин

Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск, Россия
004655@pnu.edu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе уплотнения грунтов важно иметь информацию о текущей плотности слоя, так как это позволяет оперативно корректировать нагрузку на уплотняемый материал. Полевые методы оценки качества уплотнения не справляются с этой задачей, так как производят точечную оценку в пределах площади покрытия. Поэтому все большее распространение получают системы непрерывного контроля уплотнения, устанавливаемые на вибрационные дорожные катки. В системах, разработанных компаниями BOMAG и AMMANN, для расчета показателя качества уплотнения среди прочих требуется значение фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца. Фазовый угол определяется датчиком положения дебаланса, что весьма трудоемко. Кроме этого, в состав систем непрерывного контроля уплотнения входит акселерометр. Целью данной статьи является разработка косвенного метода расчета фазового угла на основе показаний акселерометра.

Методика исследования. Для достижения цели работы произведено исследование одномассной модели «каток-грунт» в типичном для вибрационных катков режиме (периодический отрыв). В результате моделирования установлено, что реакция уплотняемого материала оказывает основное влияние на вертикальную составляющую ускорения вальца и практически не влияет на горизонтальную составляющую. Это подтверждается экспериментальными данными.

Результаты. Фазовый угол возможно определить методом взаимной корреляции сигналов горизонтального и вертикального ускорений вальца, полученных с помощью акселерометра.

Заключение. В исследовании предложен новый метод расчета фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца, исключающий непосредственное измерение указанного угла. Расчет угла производится по показаниям двухосевого акселерометра, устанавливаемого на дорожный каток. Предложенный метод позволяет упростить систему непрерывного контроля уплотнения и снизить трудоемкость измерения фазового угла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожный каток, вибрационный валец, возбудитель, вынуждающая сила, фазовый угол, ускорение, спектр

Статья поступила в редакцию 29.04.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 388-394. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

© Шишкин Е.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

EDN: HQAJCW

THE METHOD FOR CALCULATING PHASE ANGLE BETWEEN EXCITER FORCE OF VIBRATION EXCITER AND ROLLER DISPLACEMENT

Evgenii A. Shishkin

Pacific National University,

Khabarovsk, Russia

004655@pnu.edu.ru

ABSTRACT

Introduction. In the process of soil compaction it is important to have information about the current density of the layer, as it enables to quickly adjust the load on the compacted material. The field methods of compaction quality assessment do not cope with this task, as they make point estimation within the pavement area. Therefore, continuous compaction monitoring systems installed on vibratory road rollers are becoming increasingly common. The systems developed by BOMAG and AMMANN require, among other things, the phase angle between the exciter force and the roller movement to calculate the compaction quality index. The phase angle is determined by the unbalance position sensor, which is very labor-intensive. In addition, continuous compaction monitoring systems include an accelerometer. The purpose of this paper is to develop an indirect method for calculating the phase angle from accelerometer readings.

The method of research. In order to achieve the purpose of the work, a roller-soil single-mass model in a typical mode for vibratory rollers (periodic loss of contact) has been studied. As a result of modeling it has been found that the reaction of the compacted material has the main influence on the vertical component of a roller acceleration and practically does not affect the horizontal component. This is confirmed by the experimental data.

Results. The phase angle can be determined by mutual correlation of the horizontal and vertical acceleration signals of the roller obtained with the accelerometer.

Conclusion. The study proposes a new method of calculating the phase angle between the exciter force and the roller displacement, which eliminates the direct measurement of this angle. The calculation of the angle is based on the readings of a two-axis accelerometer installed on the road roller. The proposed method enables to simplify the system of continuous compaction control and reduce the labor intensity of phase angle measurement.

KEYWORDS: road roller, vibrating roller, exciter, exciter force, phase angle, acceleration, spectrum

The article was submitted 29.04.2024; approved after reviewing 20.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

Author 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. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 388-394. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>

© Shishkin E.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Стандартные методы оценки плотности уплотненного слоя грунта характеризуются низкой эффективностью, так как не позволяют определять качество уплотнения слоя по всей площади, а также нарушают целостность покрытия [1, 2]. Перспективным методом оценки качества уплотнения слоя грунта является использование показателей ICMV (Intelligent Compaction Measurement Value – значение интеллектуального измерителя уплотнения) [3, 4, 5].

На оси вибрационного вальца катка, оснащенного системой интеллектуального уплотнения, устанавливается акселерометр для регистрации ускорения вальца. Данные об ускорении вальца используются блоком управления для расчета значения интеллектуального измерителя уплотнения (ICMV) [5, 6].

Компания BOMAG разработала систему непрерывного контроля уплотнения VARIOCONTROL, в которой для оценки качества уплотнения используется вибрационный модуль $E_{\text{виб}}$, характеризующий жесткость уплотняемого грунта [7, 8]. В расчете величины вибрационного модуля $E_{\text{виб}}$ используется контактная сила взаимодействия вальца с уплотняемым материалом $F_{\text{в}}$, которая определяется из уравнения баланса сил, действующих на валец [9]:

$$F_{\text{в}} = m_{\text{в}} \omega^2 A \cos(\omega t - \varphi) + m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t) + (m_{\text{р}} + m_{\text{в}})g, \quad (1)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса вальца, кг; ω – рабочая частота вращения дебаланса, рад/с; A – амплитуда вертикального ускорения вальца, м/с²; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса вибровозбудителя, кг·м; $m_{\text{р}}$ – масса рамы, кг; φ – фазовый угол, рад.

Компания AMMANN предлагает систему непрерывного контроля уплотнения ACE (Ammann Compaction Expert), в которой для оценки качества уплотнения используется интегрированная с катком жесткость $k_{\text{в}}$ [10, 11]:

$$k_{\text{в}} = \omega^2 \left[m_{\text{в}} + \frac{m_0 r_0 \cos \varphi}{z_{\text{в}}} \right], \quad (2)$$

где $z_{\text{в}}$ – вертикальное смещение вальца, м.

Таким образом, для расчета показателей ICMV, таких как интегрированная с катком жесткость $k_{\text{в}}$, вибрационный модуль $E_{\text{виб}}$, а также для определения величины контактной силы взаимодействия вальца с уплотняемым материалом, необходимо знать значение фа-

зового угла φ между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца.

Оснащение существующего дорожного катка датчиком положения дебаланса для определения фазового угла φ является весьма трудоемкой операцией [12, 13].

Известно, что акселерометр входит в базовый комплект оборудования большинства систем непрерывного контроля уплотнения [14, 15]. Целью данной статьи является разработка косвенного метода расчета фазового угла φ на основе показаний акселерометра.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Возможность осуществления указанного метода рассмотрим на примере одномассной модели «каток-грунт» в режиме периодического отрыва, поскольку этот режим является типичным рабочим режимом вибрационных катков [16].

Вынуждающая сила вибровозбудителя с круговой вибрацией содержит вертикальную $F_{\text{в}}$ и горизонтальную $F_{\text{г}}$ составляющие, вызывающие движение вальца вдоль осей z и x соответственно (рисунок 1):

$$\begin{aligned} F_{\text{в}} &= m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t); \\ F_{\text{г}} &= m_0 r_0 \omega^2 \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $F_{\text{в}}$, $F_{\text{г}}$ – вертикальная и горизонтальная составляющие вынуждающей силы соответственно, Н; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса вибровозбудителя, кг·м; ω – рабочая частота вращения дебаланса, рад/с.

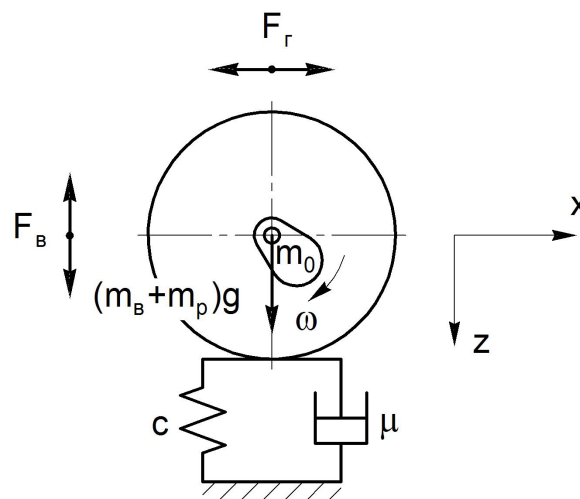


Рисунок 1 – Схема одномассной модели «каток-грунт»
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Schematic diagram of the roller-soil single-mass model
Source: compiled by the author.

Влияние реакции грунта на горизонтальную составляющую ускорения вальца $\ddot{x}_g$ минимально. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований [17, 18, 19]. Типичный спектр сигнала горизонтального

ускорения вальца содержит всего одну гармонику – основную (рисунок 2). На вертикальную составляющую ускорения вальца $\ddot{z}_g$, напротив, основное влияние оказывает реакция уплотняемого материала (рисунок 3).

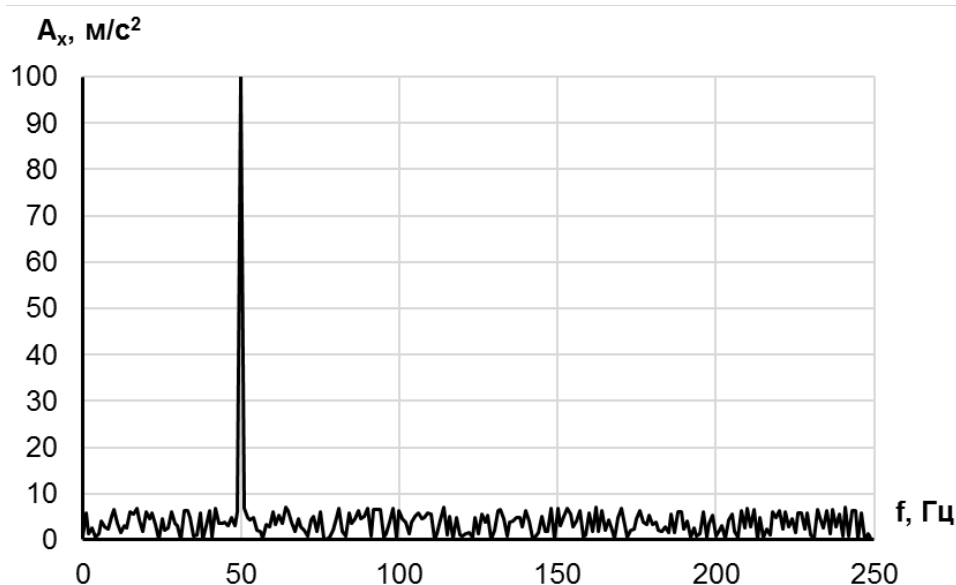


Рисунок 2 – Спектр сигнала горизонтального ускорения вальца
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spectrum of the horizontal roller acceleration signal
Source: compiled by the author.

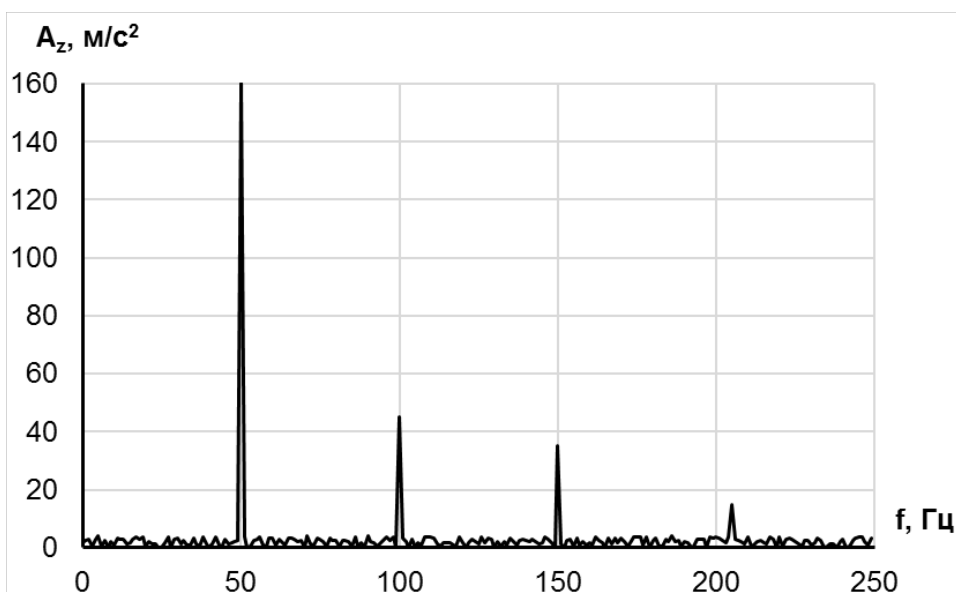


Рисунок 3 – Спектр сигнала вертикального ускорения вальца
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Spectrum of the vertical roller acceleration signal
Source: compiled by the author.

Следовательно, для определения разности фаз между составляющими ускорения достаточно определить разность фаз между сигналом горизонтального ускорения вальца при его движении в отрыве от грунта и сигналом вертикального ускорения вальца при его движении в контакте с уплотняемым материалом.

Рассмотрим движение вальца по вертикали. Как известно, такое движение вальца в контакте с грунтом для одностепенной модели описывается уравнением

$$z_g = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где z_g – вертикальное смещение вальца, м; φ – фазовый угол, рад; A – амплитуда колебаний, м.

Дважды продифференцировав (4), получим

$$\ddot{z}_g = -\omega^2 A \cos(\omega t - \varphi) = -A_z \cos(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

где $\ddot{z}_g$ – вертикальная составляющая ускорения вальца, м/с²; $A_z = \omega^2 A$ – амплитуда вертикальной составляющей ускорения вальца (в контакте с грунтом), м/с².

Рассмотрим движение вальца по горизонтали. Дифференциальное уравнение горизонтального движения вальца в отрыве от грунта имеет вид

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin(\omega t) - \ddot{x}_g m_g = 0, \quad (6)$$

где $\ddot{x}_g$ – горизонтальная составляющая ускорения вальца, м/с²; m_g – масса вальца, кг.

Из (6) получим

$$\ddot{x}_g = \frac{m_0 r_0 \omega^2}{m_g} \sin(\omega t) = A_x \sin(\omega t), \quad (7)$$

где $A_x = m_0 r_0 \omega^2 / m_g$ – амплитуда горизонтальной составляющей ускорения вальца (в отрыве от грунта), м/с².

Определим разность фаз α_{x-z} между горизонтальной и вертикальной составляющими ускорения вальца.

Преобразуем выражения (5) и (7):

$$\ddot{z}_g = A_z \cos(\omega t - \varphi - \pi); \quad (8)$$

$$\ddot{x}_g = A_x \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$

Тогда разность фаз α_{x-z} равна

$$\alpha_{x-z} = \left(-\frac{\pi}{2}\right) - (-\varphi - \pi) = \varphi + \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Из выражения (8) получим фазовый угол

$$\varphi = \alpha_{x-z} - \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, для определения фазового угла φ между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца необходимо вычислить разность фаз α_{x-z} между сигналами горизонтального и вертикального ускорений вальца, полученных с помощью акселерометра, и от результата отнять угол $\pi/2$. Угол α_{x-z} рассчитывается стандартным методом взаимной корреляции [20], используемым в теории обработки сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В то время как классические системы непрерывного контроля уплотнения оснащены специальным датчиком для измерения фазового угла между вынуждающей силой возбудителя и перемещением вальца, в данном исследовании предложен новый метод оценки фазового угла без использования указанного датчика. Разработанный метод расчета фазового угла φ заключается в сравнении фаз вертикального и горизонтального ускорения вибрационного вальца. Для получения значений указанных ускорений достаточно установить на дорожный каток двухосевой акселерометр, а сдвиг фаз α между ускорениями вычислять методом взаимной корреляции или каким-либо другим. Предложенный метод упрощает систему непрерывного контроля уплотнения за счет отказа от использования специального датчика измерения фазового угла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influent factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023; 13(10): 5953. DOI: 10.3390/app13105953.
2. Тюремнов И.С., Морев А.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2015; 4(39): 99–108.
3. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of

subgrade based on regression analysis. *Advances in materials science and engineering*. 2021; 2021: 4100896. DOI: 10.1155/2021/4100896.

4. Yangping Y, Er Bo S. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart construction and sustainable cities*. 2023; 1. DOI: 10.1007/s44268-023-00004-4.

5. Wang Z., Qian J., Ling J., Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied sciences*. 2023; 14(1): 68. DOI: 10.3390/app14010068.

6. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Методика определения свойств асфальтобетонной смеси, уплотняемой вибрационным катком. *Справочник // Инженерный журнал*. 2022; 3(300): 47–52. DOI: 10.14489/hb.2022.03.pp.047–052

7. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104473.

8. Тюремнов И.С., Морев А.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2016; 1(40): 69–76.

9. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.004.

10. Meehan C., Cacciola D., Tehrani F., Baker W. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests. *Automation in construction*. 2016; 73(1). DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.017.

11. Mooney M., Adam D. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview. *Proceedings of the 7th FMGM 2007: Field measurements in geomechanics*. 2007; 1–12. DOI: 10.1061/40940(307)80.

12. Смоляков А.А., Шишкин Е.А. Система автоматического управления вибратором вальца дорожного катка // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2021; 2(61): 45–52.

13. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the vibratory compaction process for roads. *Buildings*. 2023; 13(11): 2837. DOI 10.3390/buildings13112837.

14. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // *Системы. Методы. Технологии*. 2022; 1(53): 36–42. DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42.

15. Emelyanov R.T., Prokopenko A.P., Vasiliev Y.V. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics*. 2021; 1889: 42059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

16. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: 10.3390/infrastructures8070110.

17. Тюремнов И.С., Краюшкин А.С., Шорохов Д.А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком НАММ 3411 // *Вестник СибАДИ*. 2022; 6(88): 828–840. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840.

18. Kim J., Lee S.-Y., Cho J.-w. A study on the analysis of the ground compaction effect according to the roller operation method through CMV analysis using IC rollers. *Advances in civil engineering*. 2023; 2023: 6589652. DOI: 10.1155/2023/6589652.

19. Hu W., Polaczyk P., Jia X., Gong H., Huang B. Visualization and quantification of lab vibratory compacting process for aggregate base materials using accelerometer. *Transportation Geotechnics*. 2020; 25: 100393. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100393.

20. Зайцева И.Н. Алгоритм определения сдвига фаз гармонических сигналов с использованием стохастической дискретизации // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2019; 3: 90–96. DOI 10.24143/2072-9502-2019-3-90-96.

REFERENCES

1. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influent factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023; 13(10): 5953. DOI: 10.3390/app13105953.

2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. The review of the Continuous Compaction Control systems for soil compaction by vibratory rollers. Part 1. *Bulletin of PNU*. 2015; 4(39): 99–108. (in Russ.)

3. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of subgrade based on regression analysis. *Advances in materials science and engineering*. 2021; 2021: 4100896. DOI: 10.1155/2021/4100896.

4. Yangping Y, Er Bo S. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart construction and sustainable cities*. 2023; 1. DOI: 10.1007/s44268-023-00004-4.

5. Wang Z., Qian J., Ling J., Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied sciences*. 2023; 14(1): 68. DOI: 10.3390/app14010068.

6. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Method for determining properties of asphalt concrete mixture compacted by vibratory roller. *Handbook. An Engineering journal*. 2022; 3(300): 47–52. DOI: 10.14489/hb.2022.03.pp.047–052. (in Russ.)

7. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104473.

8. Tyuremnov I.S., Morev A.S. The review of the Continuous Compaction Control systems for soil compaction by vibratory rollers. Part 2. *Bulletin of PNU*. 2016; 1(40): 69–76. (in Russ.)

9. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory

compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.004.

10. Meehan C., Cacciola D., Tehrani F., Baker W. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests. *Automation in construction*. 2016; 73(1). DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.017.

11. Mooney M., Adam D. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview. *Proceedings of the 7th FMGM 2007: Field measurements in geomechanics*. 2007; 1–12. DOI: 10.1061/40940(307)80.

12. Smolyakov A.A., Shishkin E.A. The system of automated control of road roller drum vibrator. *Bulletin of PNU*. 2021; 2(61): 45–52. (in Russ.)

13. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the vibratory compaction process for roads. *Buildings*. 2023; 13(11): 2837. DOI 10.3390/buildings13112837.

14. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Justification of the method of regulating the contact force of the vibrating roller with the compacted material. *Systems Methods Technologies*. 2022; 1(53): 36–42. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42. (in Russ.)

15. Emelyanov R.T., Prokopen A.P., Vasiliev Y.V. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics*. 2021; 1889: 42059. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

16. Pistrol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: 10.3390/infrastructures8070110.

17. Tyuremnov I.S., Krayushkin A.S., Shorokhov D.A. Experimental studies on compaction of soil with HAMM 3411 vibrating roller. *The Russian*

Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19(6): 828–840. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

18. Kim J., Lee S.-Y., Cho J.-w. A study on the analysis of the ground compaction effect according to the roller operation method through CMV analysis using IC rollers. *Advances in civil engineering*. 2023; 2023: 6589652. DOI: 10.1155/2023/6589652.

19. Hu W., Polaczyk P., Jia X., Gong H., Huang B. Visualization and quantification of lab vibratory compacting process for aggregate base materials using accelerometer. *Transportation Geotechnics*. 2020; 25: 100393. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100393.

20. Zaitseva I.N. Algorithm for determining phase shift of harmonic signals using stochastic discretization. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2019; 3: 90–96. DOI 10.24143/2072-9502-2019-3-90-96. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шишкин Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доц. высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>, **SPIN-код:** 6027-4510, e-mail: 004655@pnu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgenii A. Shishkin – Cand. of Sci., Associate Professor of Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (136 Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680035), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>, **SPIN-code:** 6027-4510, e-mail: 004655@pnu.edu.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>
EDN: FIDYXY



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА РЕГУЛЯРНОГО СООБЩЕНИЯ

С.А. Аземша

Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель, Республика Беларусь
s-azemsha@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Степень использования вместимости пассажирских транспортных средств влияет на экономическую составляющую работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения, поскольку определяется количеством перевозимых пассажиров и величиной вместимости используемого пассажирского транспортного средства. Это обусловлено тем, что величина пассажиропотока оказывает влияние на выручку от перевозки, а вместимость пассажирского транспортного средства – на себестоимость перевозки. Одной из задач, сформулированной в программно-целевых документах Республики Беларусь, является выход на полную самоокупаемость работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения. Решить такую задачу можно максимизацией степени использования вместимости, установленной производителем пассажирского транспортного средства.

Цель работы – оценить степень использования вместимости пассажирских транспортных средств и динамику ее изменения, а также разработать мероприятия по повышению эффективности работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения.

Материалы и методы. При написании статьи использовались данные, полученные натурным обследованием пассажиропотоков в одном из городов Республики Беларусь, проведенные в 2019 и в 2024 гг., применялись статистические методы (описательная статистика, подгонка, визуализация, оценка значимости различий при помощи статистических критериев), анализ научной литературы и технологии работы пассажирского транспорта, синтез предложений.

Выводы. Показана невысокая степень использования вместимости пассажирских транспортных средств. Предложена новая технология организации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения, позволяющая повысить применение вместимости пассажирских транспортных средств и за счет этого эффективность выполняемой им работы.

Возможность последующего использования результатов научной работы. Полученные результаты обосновывают необходимость разработки научного инструментария для оптимизации закрепления пассажирских транспортных средств за рейсами с учетом пассажиронапряженности на них и ее колебания и других ограничений.

Практическое значение. Данная статья показывает необходимость разработки мер по повышению использования вместимости пассажирских транспортных средств.

Оригинальность. В данной работе показано изменение степени применения вместимости пассажирских транспортных средств за период времени, прошедший между проведением обследований, установлены факторы, влияющие на такую степень использования, предложена новая технология организации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения. Статья будет полезна для должностных лиц органов управления, ответственных за организацию работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения, а также работников предприятий городского пассажирского транспорта, ученых транспортной отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирское транспортное средство, городской пассажирский транспорт регулярного сообщения, вместимость, пассажиронапряженность, коэффициент пассажиронапряженности, технология перевозок

Статья поступила в редакцию 16.03.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

© Аземша С.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Аземша С.А. Совершенствование технологии работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 396-411. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>

EDN: FIDYXY

TECHNOLOGY OF REGULAR URBAN PASSENGER TRANSPORTATION OPERATION IMPROVEMENT

Sergei A. Azemsha

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus
s-azemsha@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The degree of passenger vehicle capacity utilisation affects the economic component of regular urban passenger transport operation, as it depends on the number of passengers transported, which affects the revenue from transportation, as well as on the passenger vehicle capacity, which affects the cost of transportation. One of the tasks formulated in the programme-target documents of the Republic of Belarus is to achieve full self-sufficiency of urban regular passenger transport. One of the ways to ensure this can be maximising the degree of capacity utilisation set by the manufacturer of the passenger vehicle.

The aim of the paper is to estimate the degree of passenger vehicle capacity utilisation and dynamics of its change, as well as to develop measures to improve the efficiency of urban regular passenger transport.

Materials and methods. When writing the article, the data obtained by a full-scale survey of passenger flows in one of the cities of the Republic of Belarus, conducted in 2019 and in 2024, were used. When writing the article, statistical methods (descriptive statistics, fitting, visualisation, assessment of significance of differences using statistical criteria), analysis of scientific literature and work technology, synthesis of proposals were used.

Conclusions. The low degree of utilisation of passenger vehicle capacity is shown. The new technology of the organisation of work of the city passenger transport of regular communication, allowing to increase use of capacity of passenger vehicles and, at the expense of this efficiency of such work is offered.

The possibility of further use of the results of scientific work. The received results substantiate necessity of development of scientific toolkit for optimisation of assignment of passenger vehicles to flights taking into account passenger load on them and other restrictions.

Practical significance. This article shows the need to develop measures to improve the efficiency of passenger vehicle capacity utilisation for the purposes of increasing the efficiency of urban regular passenger transport.

Originality. This paper shows the change in the degree of use of passenger vehicle capacity, shows the factors affecting it, and proposes a new technology for organising the work of urban regular passenger transport. The article will be useful for officials of the management bodies responsible for the organisation of the work of urban passenger transport of regular communication, as well as employees of the enterprises of urban passenger transport, transport scientists.

KEYWORDS: passenger vehicle, regular urban passenger transport, capacity, passenger load, passenger load factor, passenger load factor, transportation technology

The article was submitted 16.03.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

Author have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Azemsha S.A. Technology of regular urban passenger transportation operation improvement. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (3): 396-411. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>

© Azemsha S.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Городской пассажирский транспорт регулярного сообщения (ГПТРС) играет огромную роль в жизни современных городов. Это обусловлено тем, что значительная доля передвижений в городах совершается при помощи ГПТРС [1, 2], влиянием ГПТРС на жизнь городов [3, 4, 5], экономику [6, 7, 8], экологию [9, 10, 11], безопасность дорожного движения^{1,2} [12], здоровье населения [13, 14, 15], устойчивое развитие^{3,4} [16].

В то же время окупаемость работы ГПТРС невысока и составляет для условий Республики Беларусь порядка 70% [17]. Вместе с тем в Беларуси к концу 2025 г. стоит задача обеспечить окупаемость перевозок собственными доходами транспортных организаций⁵.

Хорошо описанными в научной литературе способами повышения окупаемости работы ГПТРС являются:

- оптимизация структуры парка пассажирских транспортных средств [18, 19, 20];
- внедрение методов транспортного планирования в градостроительную политику [21, 22];
- оптимизация маршрутной сети ГПТРС [23];
- распределение автобусного парка по маршрутам [20, 24, 25].

На практике же в настоящее время снижение затрат достигается путем сокращения числа выполняемых рейсов, сокращением числа маршрутов, что негативным образом сказывается на качестве предоставляемых ГПТРС услуг и ведет к оттоку пассажиропотока и росту интенсивности использования личного транспорта.

Вместе с тем показано наличие связи между наполняемостью пассажирских транспортных средств (ПТС) и окупаемостью их работы [26], что обуславливает целесообразность повышения степени использования вместимости

ПТС для достижения поставленной задачи выхода на самоокупаемость работы ГПТРС.

Вопросы оценки эффективности использования вместимости ПТС отражены во многих научных трудах. Так, в работе [27] авторы установили, что в отношении наполняемости на многих маршрутах действует закон Паретто – на протяжении 80% пути маршрута используется только 20% вместимости автобусов. В работе [28] подчеркнута, что уровень загруженности автобусов сильно различается между государствами Европейского Союза. Например, в Великобритании автобус перевозит в среднем около 9 человек, в то время как во Франции этот показатель составляет около 25. Различия между государствами авторы объясняют различной организацией работы ГПТРС, а также формой собственности. Аналогичные исследования с такими же выводами были проведены и в США⁶. В них также отмечается низкая эффективность использования вместимости пассажирских транспортных средств.

Для условий Республики Беларусь установлено, что уровень использования вместимости ПТС невысок, и определяется коэффициентом пассажиронапряженности, значения которого составляет в среднем 30% [29]. Также показано, что существует значимая неравномерность использования вместимости ПТС по маршрутам, часам суток на маршруте и на некоторых маршрутах по направлениям движения.

В данной статье приведены результаты исследований пассажиропотоков в г. Мозыре, полученных по данным натурных наблюдений, проведенных в 2019 и 2024 гг. На их основе рассчитывается показатель, оценивающий степень использования вместимости ПТС, показываются факторы его определяющие, устанавливаются сложившиеся тенденции его изменения. На основании расчетов формулируется предложение по повышению эффективности работы ГПТРС.

¹ WHO, 2018. Global Status Report on Road Safety 2018. Geneva. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>

² APTA, 2016. The Hidden Traffic Safety Solution: Public Transportation

³ Sustainable Mobility for All // Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.sum4all.org/publications/global-mobility-report-2017> (дата обращения: 11.09.2018).

⁴ Key world energy statistics // сайт IEA. Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>. (дата обращения: 12.10.2020).

⁵ О Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 марта 2021 г., № 165 (в ред. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29 декабря 2023 г. № 1001) // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь, Минск, 2024.

⁶ Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time. Режим доступа: https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf. (дата обращения: 11.09.2018)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При написании статьи использовались данные, полученные натурным обследованием пассажиропотоков в одном из городов Республики Беларусь – г. Мозыре. Такие обследования были проведены в 2019 и в 2024 гг. В общем, за сутки в 2019 г. выполнялось 1276 рейсов за день, а в 2024 – 909. Кроме того, на 2019 г. маршрутная сеть была представлена 22 маршрутами, а в 2024 – 17. За 5 лет количество маршрутов уменьшилось на 5 (23%), а количество выполняемых рейсов на 367 (29%). Все это отражает существующий в данное время на практике подход к снижению затрат на функционирование ГПТРС и является причиной роста автомобилизации со всеми ее негативными проявлениями.

Обследование пассажиропотоков проводилось учетчиками, находящимися в салоне ПТС. Указанные лица были обеспечены бланками для записей, в которые они вносили время начала и окончаний рейса, начальный и конечный пункт, марку автобуса и количество вошедших и вышедших пассажиров на каждой остановке. По полученным таким образом данным было определено значение пассажиронапряженности во время выполнения каждого рейса – максимальное количество пасса-

жиров, находящихся в салоне ПТС за время выполнения рейса, а также коэффициент пассажиронапряженности – отношение пассажиронапряженности за рейс к вместимости ПТС, выполняющего данный рейс. Всего было обследовано 659 (51,6%) рейсов в 2019 г. и 781 (85,9%) рейс в 2024 г. Таким образом, исследуемый набор данных состоит из двух выборок значений пассажиронапряженности: первая – для 2019 г., а вторая – для 2024. Фрагмент такой выборки представлен в таблице 1.

К полученным выборкам значений пассажиронапряженностей применен следующий статистический инструментарий, реализованный в пакете прикладных программ⁷:

1. Описательная статистика: среднее, медиана, минимум, максимум, стандартное отклонение, асимметрия, стандартная ошибка асимметрии, эксцесс, стандартная ошибка эксцесса.
2. Визуализация данных: диаграммы размаха, гистограммы распределения (в том числе совмещенные для двух случайных величин).
3. Определение законов распределения случайных величин при помощи:
 - оценки соотношений асимметрия / стандартная ошибка асимметрии и эксцесс / стандартная ошибка эксцесса;

Таблица 1
Фрагмент полученной таблицы исходных данных
Источник: составлено автором.

Table 1
Fragment of the obtained table of initial data
Source: compiled by the author.

№ маршрута	Длина маршрута, км	Порядковый номер автобуса	Начальный пункт	Конечный пункт	Автобус	Начало рейса	Конец рейса	Пассажиронапряженность, пасс
8	16,8	11	АВ «Мозырь»	5-й микрорайон	МАЗ 103	19:42	20:32	20
14	9,6	20	АВ «Мозырь»	пл. Ленина	МАЗ 103	5:54	6:29	41
14	13,2	20	пл. Ленина	АВ «Мозырь»	МАЗ 103	6:31	7:11	50
14	9,6	20	АВ «Мозырь»	пл. Ленина	МАЗ 103	7:22	7:57	40
14	13,2	20	пл. Ленина	АВ «Мозырь»	МАЗ 103	7:59	8:39	49

⁷ Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A

– анализа гистограмм распределения частот исследуемых величин, их нормально-вероятностных графиков и ящичных диаграмм размаха;

– р-значений критериев Колмогорова–Смирнова, Андерсон–Дарлинга и Хи-квадрат.

4. Сравнение значимости различий в выборках при помощи:

– критериев Вальда–Вольфовица, Колмогорова–Смирнова и U теста Манна–Уитни – при сравнении двух независимых выборок;

– дисперсионного анализа Краскела–Уоллеса, медианного теста, сравнения средних рангов для всех групп – при сравнении нескольких независимых выборок.

Дальнейший анализ результатов применения такого статистического инструментария, существующей технологии работы ГПТРС и научной литературы по профилю данной публикации, позволил синтезировать предложение по повышению эффективности функционирования ГПТРС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные статистические характеристики пассажиронапряженности приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что все приведенные в ней статистические показатели (кроме стандартного отклонения) пассажиронапряженности в 2024 г. снизились по отношению к значению этого показателя в 2019 г. Оценка соотношений асимметрия / стандартная ошибка асимметрии и эксцесс / стандартная ошибка эксцесса показывает, что распределение исследуемых случайных величин отлично от нормального закона. Для оценки нормальности распределения также были проанализированы гистограммы распределения частот исследуемых величин, их нормально-вероятностные графики и ящичные диаграммы размаха. Все проведенные тесты показали, что распределение исследуемых величин отлично от нормального.

Результаты подгонки распределения при помощи р-значений критерия Колмогорова–Смирнова, Андерсон–Дарлинга и Хи-квадрат показали, что исследуемые случайные величины распределены по обобщенному распределению экстремальных значений, что также согласуется с полученными ранее данными.

Результаты расчета средних значений коэффициента пассажиронапряженности в г. Мозыре ($\overline{Kп}$), а также их предельной абсолютной ошибки (ε) приведены в таблице 3.

Таблица 2
Статистические характеристики значений пассажиронапряженности
Источник: составлено автором.

Table 2
Statistical characteristics of passenger load values
Source: compiled by the author.

Год	N набл.	Среднее	Медиан	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Асимметрия	Стандартная ошибка асимметрии	Эксцесс	Стандартная ошибка эксцесса
2019	659	0,277	0,24	0,0095	1,18	0,177	1,57	0,095	3,591	0,190
2024	781	0,2706	0,212	0,00	1,057	0,219	1,54	0,088	2,369	0,175

Таблица 3
Сравнение средних значений пассажиронапряженности по годам обследований
Источник: составлено автором.

Table 3
Comparison of average values of passenger load by survey years
Source: compiled by the author.

Год обследования	Объем выборки, рейсов		ε
2019	659	0,278	0,017
2024	781	0,271	0,017

Была выдвинута гипотеза о наличии значимых различий в коэффициенте пассажиронапряженности по годам. Соответствующая диаграмма размаха приведена на рисунке 1.

Для оценки значимости различий в двух выборках значений коэффициентов пассажиронапряженности использовались непараметрические критерии оценки значимости различий в двух независимых выборках (критерий Вальда-Вольфовица, Колмогорова-Смирнова и U тест Манна-Уитни). Результаты их расчета позволяют сделать вывод о значимости различий в средних значениях анализируемых показателей, т.е. значения коэффициента пассажиронапряженности в г. Мозыре в 2019 и 2024 гг. сильно отличаются друг от друга.

Также была выдвинута гипотеза о наличии значимых различий значений коэффициента пассажиронапряженности в г. Мозыре по маршрутам (рисунок 2) и по времени суток (рисунок 3).

При оценке значимости различий коэффициентов пассажиронапряженности по маршрутам и по времени суток использовались дисперсионный анализ Краскела-Уоллеса, медианный тест, сравнение средних рангов для всех групп. При оценке значимости различий по направлениям движения на каждом маршруте использовались тест Вальда-Вольфовица, Колмогорова-Смирнова, U-тест Мана-Уитни.

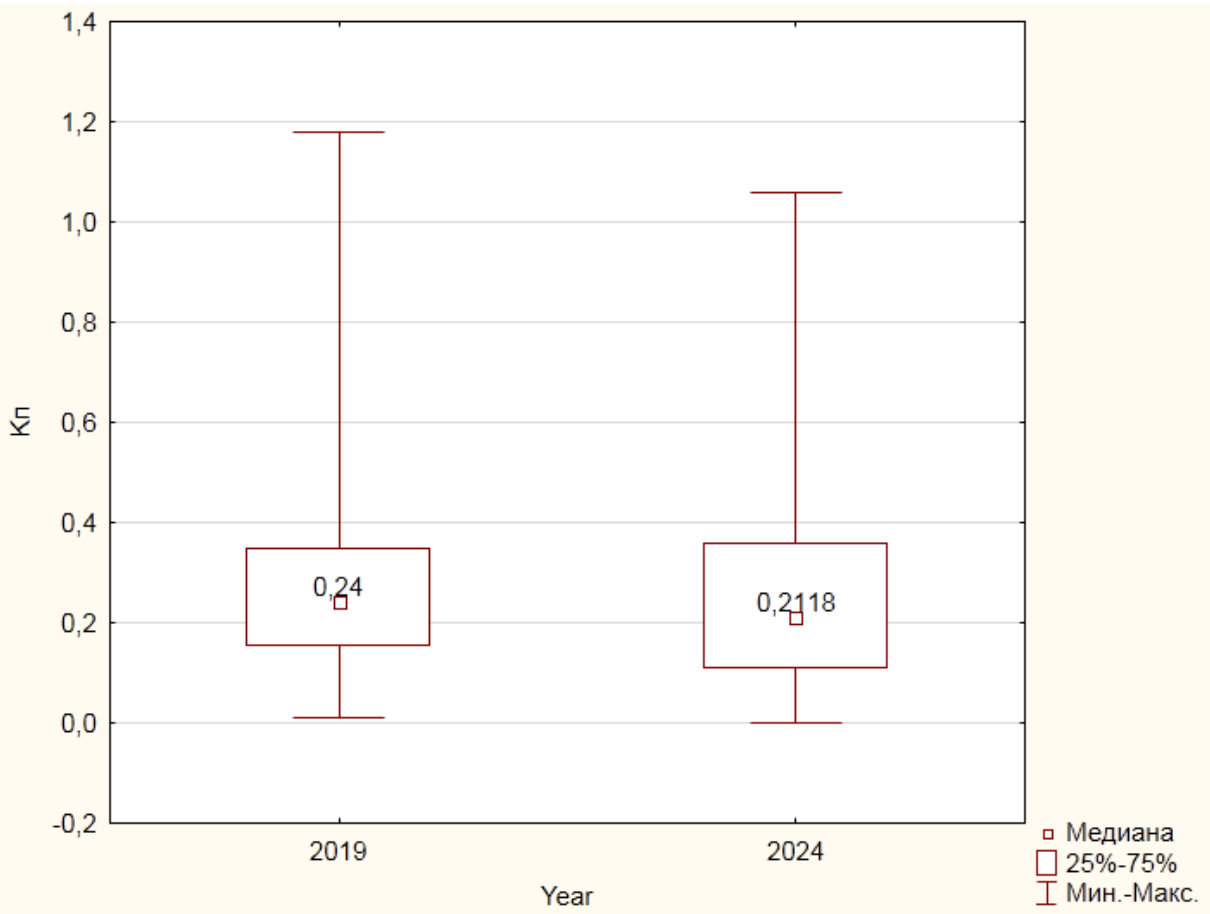
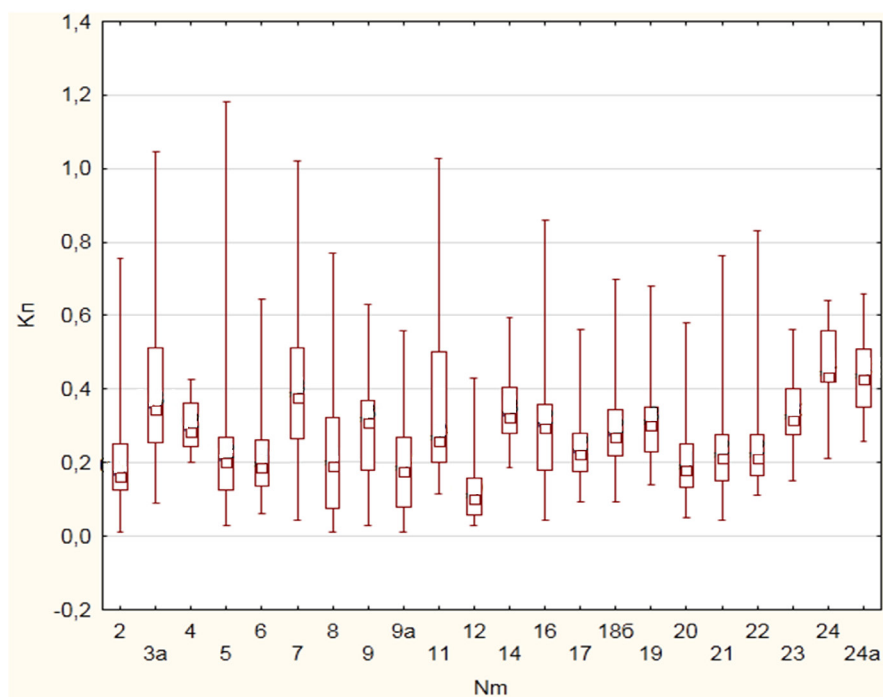
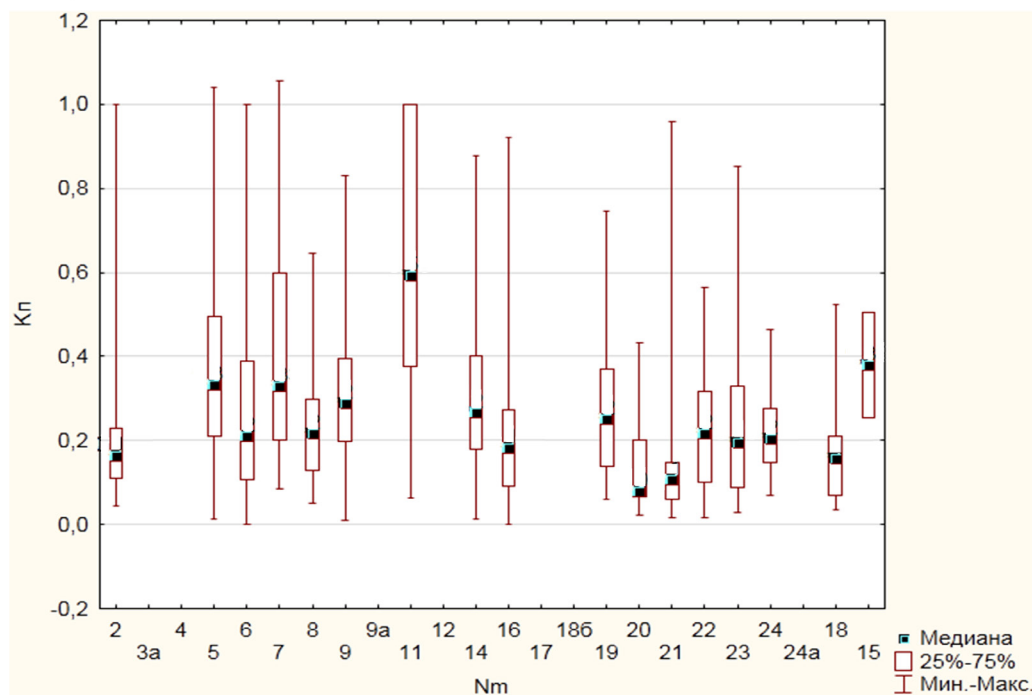


Рисунок 1 – Диаграмма размаха значений коэффициента пассажиронапряженности по годам
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Diagram of the range of passenger load factor values by years
Source: compiled by the author.



a



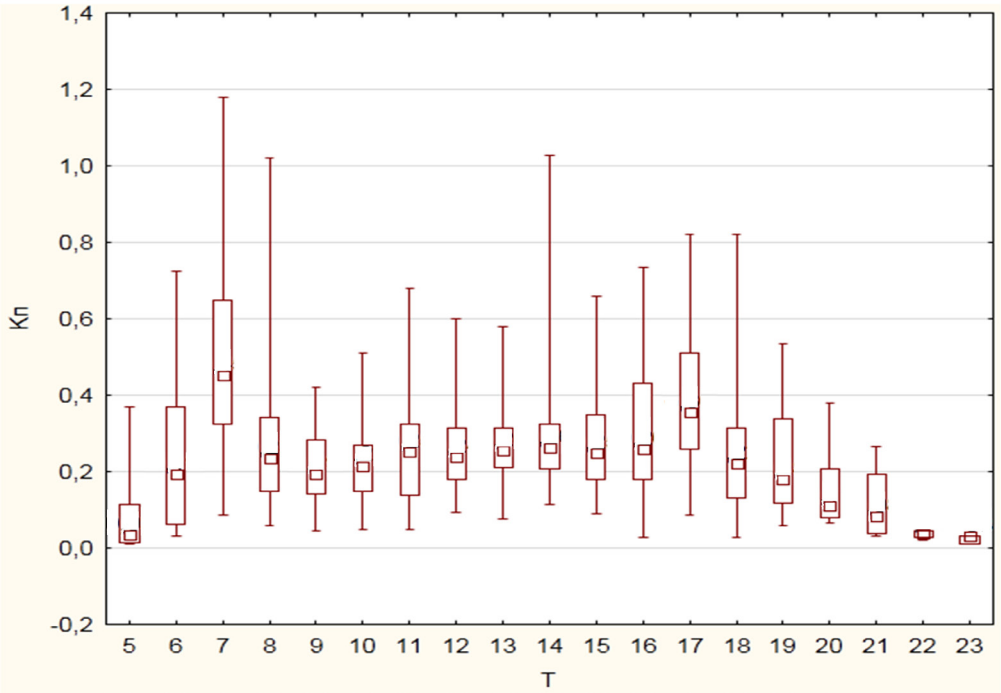
б

Рисунок 2 – Коэффициент пассажиронапряженности по маршрутам работы:
а – 2019 г.; б – 2024 г.

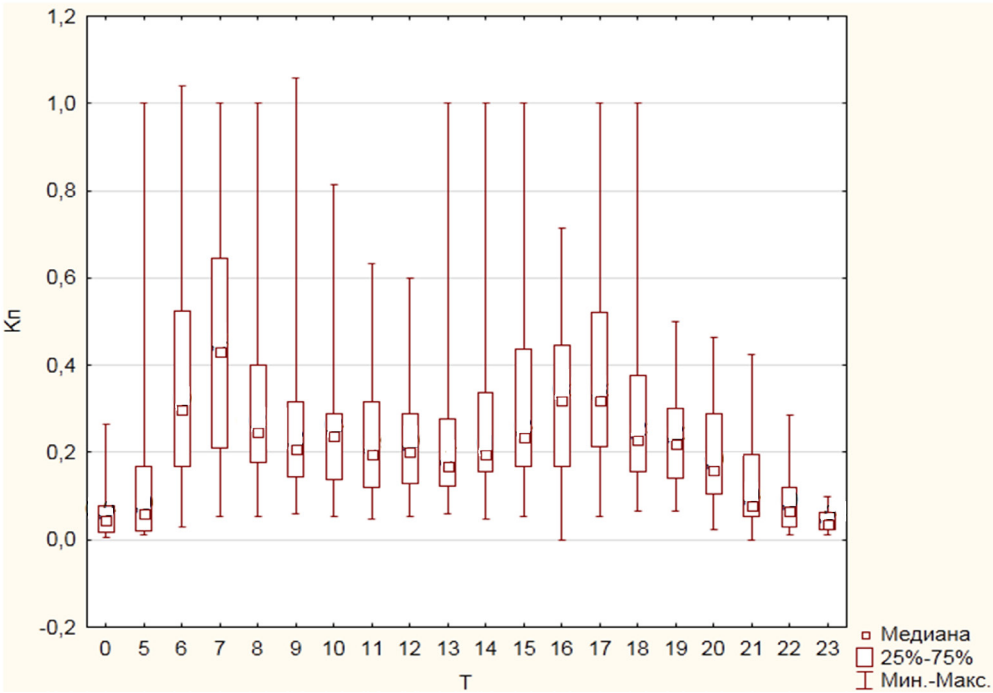
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Passenger load factor by route of operation:
а – 2019; б – 2024

Source: compiled by the author.



a



б

Рисунок 3 – Коэффициент пассажиронапряженности по часам суток:
а – 2019 г.; б – 2024 г.
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Passenger load factor by hour of the day:
а – 2019; б – 2024
Source: compiled by the author.

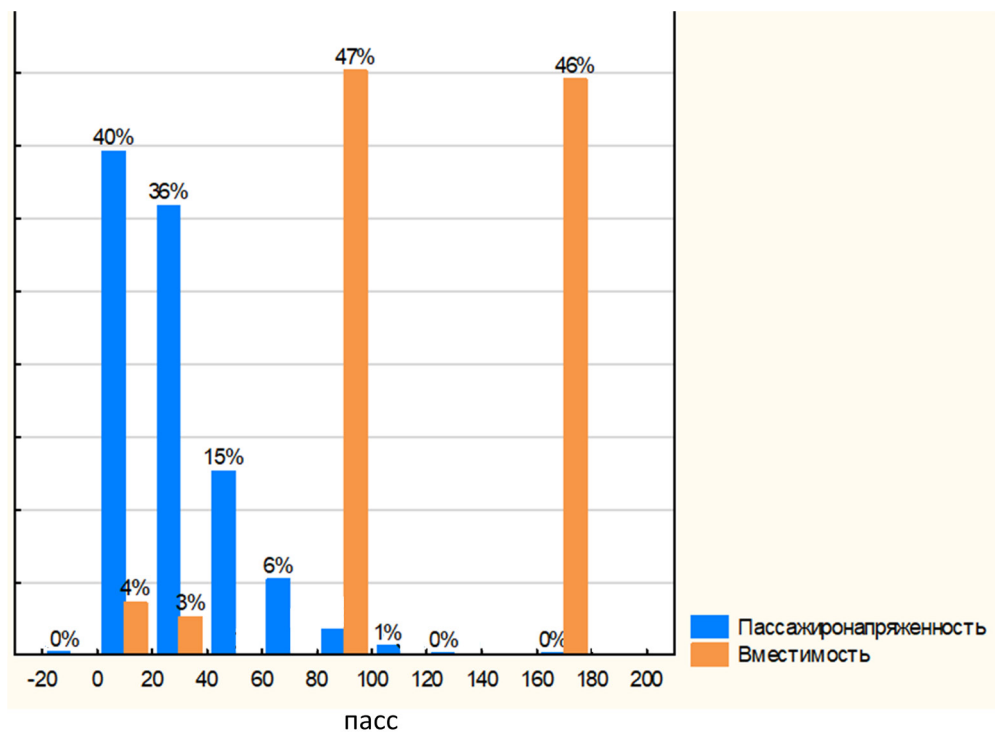


Рисунок 4 – Гистограмма распределения пассажиронапряженности и вместимости автобусов по рейсам
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Histogram of distribution by trips of passenger load and bus capacity
Source: compiled by the author.

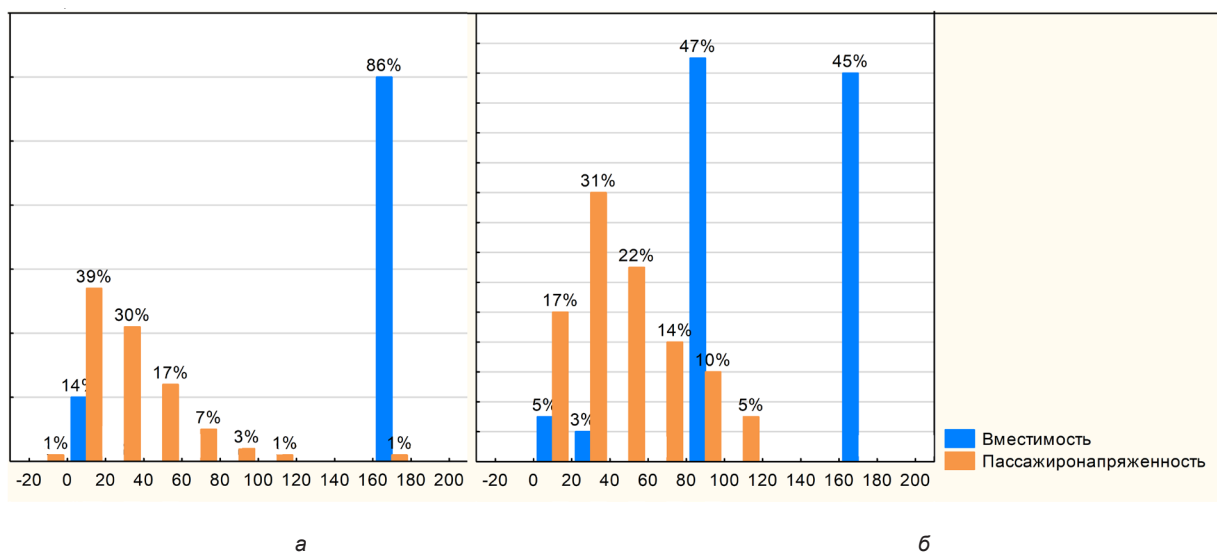


Рисунок 5 – Распределение вместимости и пассажиронапряженности:
а – на маршруте № 6 за сутки; б – с 7:00 до 8:00 на всех маршрутах
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Distribution of capacity and passenger load:
а – on route No. 6 per day; б – from 7:00 to 8:00 on all routes
Source: compiled by the author.

Результаты расчетов показывают, что значения коэффициентов пассажиронапряженности значительно отличаются по маршрутам движения и по часам суток.

На рисунке 4 приведена гистограмма распределения пассажиронапряженности и вместимости автобусов по рейсам.

Из рисунка 4 видно, что подавляющее число рейсов выполняется автобусами вместимостью от 80 до 100 пассажиров (47%) и от 160 до 180 пассажиров (46%). В то же время пассажиронапряженность от 80 до 180 пассажиров наблюдается лишь при выполнении 3% рейсов. Подавляющее большинство рейсов (76%) пассажиронапряженность не превышает 40 пассажиров. Вместе с тем доля рейсов, выполняемых автобусами вместимостью до 40 пассажиров, составляет порядка 7%.

На рисунке 5 приведена гистограмма распределения пассажиронапряженности и вместимости автобусов на одном маршруте за все часы суток и за один час суток на всех маршрутах.

Из рисунка 5 видно, что имеется несоответствие (превышение) вместимости работающих автобусов существующей пассажиронапряженности как по маршрутам, так и по часам суток.

Таким образом, анализ рисунков 4 и 5 обуславливает целесообразность проведения закупки автобусов вместимости, соответствующей пассажиронапряженности, а также технологии управления ими, включающей распределение автобусов по рейсам маршрутов с учетом минимизации разницы между их вместимостью и пассажиронапряженностью.

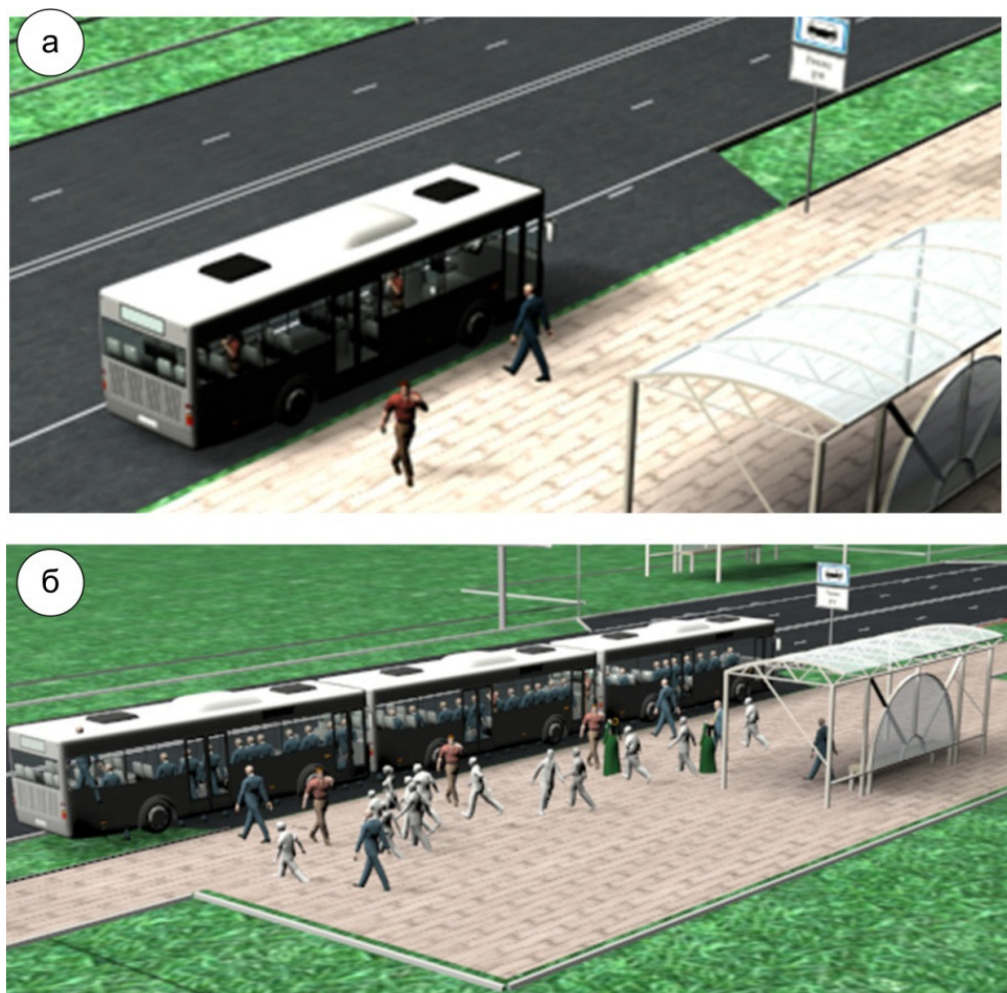


Рисунок 6 – Использование составов модульных ПТС с различным количеством модулей: а – один модуль при спаде пассажиропотока; б – три модуля в период роста пассажиропотока [31]

Figure 6 – Use of trains of modular TCPs with different number of modules: а – one module during passenger traffic decline; б – three modules during passenger traffic growth [31]

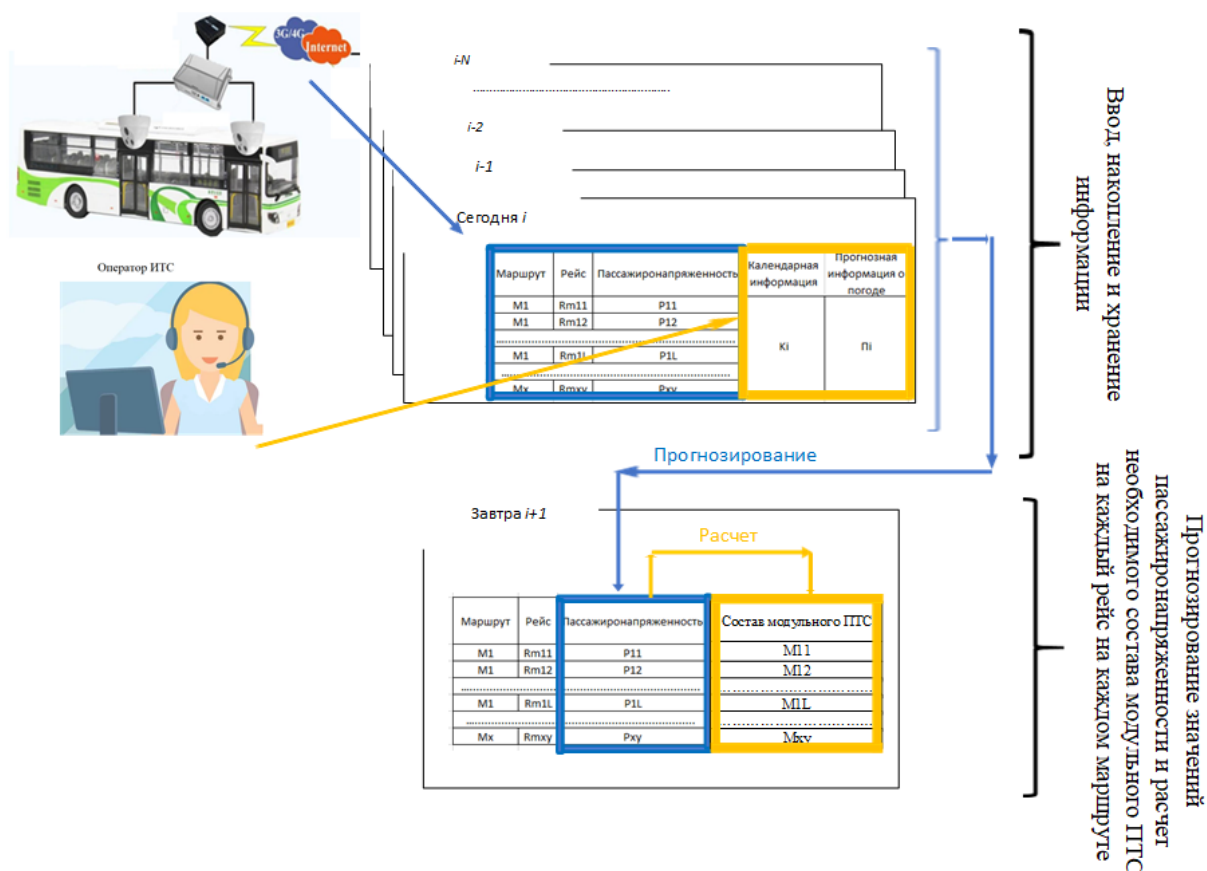


Рисунок 7 – Схема функционирования предлагаемой интеллектуальной системы управления ГПТРС
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Scheme of operation of the proposed intelligent control system for regular urban passenger transport
Source: compiled by the author.

Следует отметить, что приведенные на рисунках 1, 2, 3, 4, 5 данные получены на основании исследования пассажиропотоков за 1 день. В то же время известно, что объем перевозок, а следовательно, коэффициент пассажиронапряженности, вариативен и зависит от дня недели, месяца года, календарного года, типа дня недели (праздник/выходной), осадков, ветра, температуры воздуха [30]. Это обуславливает необходимость изучения соответствующих зависимостей и накопления определенных данных. Поэтому предложена новая технология организации работы ГПТРС, которая предполагает наличие ретроспективных данных о пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута и факторов,

на него влияющих, а также соответствующие формализованные зависимости, описывающие такое влияние.

На основании таких данных предлагается ежедневно прогнозировать пассажиронапряженность на каждом рейсе каждого маршрута и на этой основе назначать композиции из модулей ПТС (рисунок 6), обеспечивающих максимальное соответствие вместимости и мощности пассажиропотока.

Для реализации предлагаемой технологии организации работы ГПТРС необходимо:

1. Оснастить парк ПТС датчиками подсчета пассажиропотока.
2. Разработать программный продукт, позволяющий:

- по данным подсчета числа входящих и выходящих пассажиров определять пассажиронапряженность по каждому рейсу каждого маршрута;

- хранить информацию о пассажиронапряженности по каждому рейсу каждого маршрута;

- вводить календарную информацию и прогнозные сведения о погоде на каждый последующий день;

- хранить календарную информацию и прогнозные сведения о погоде на каждый последующий день;

- прогнозировать (в том числе методами интеллектуального анализа данных) на каждый последующий день значения пассажиронапряженности по каждому рейсу каждого маршрута на основе анализа имеющейся информации о пассажиронапряженности, календарной информации и прогнозных сведений о погоде;

- на основании прогнозных значений пассажиронапряженности по каждому рейсу каждого маршрута распределять парк пассажирских транспортных средств с учетом минимизации разницы вместимости выполняющего рейс ПТС и пассажиронапряженности на этом рейсе.

Такой подход к организации работы ГПТРС подразумевает использование современных технологий, таких как интеллектуальный анализ данных, машинного обучения, big-data технологий. Общая схема функционирования данной интеллектуальной системы управления ГПТРС представлена на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что ежедневно информация от датчиков подсчета пассажиров поступает на сервер, где из нее извлекаются сведения о пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута. Сюда же оператор ежедневно заносит календарную

информацию (день недели, его тип, месяц и т.д.), а также прогнозную информацию о погоде на следующий день. На основании массива такой введенной информации ежедневно проводится прогнозирование значений пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута на следующий день. На основании таких прогнозных значений, а также с учетом имеющегося парка модульных ПТС структуры маршрутной транспортной сети производится расчет состава модульного ПТС для работы на каждом рейсе каждого маршрута.

В то же время следует отметить, что на текущий момент производители не имеют в своем арсенале модульных ПТС. Хотя опыт эксплуатации прицепных ПТС был успешно реализован в недалеком прошлом^{8,9,10}.

В настоящее время определенные работы в этом направлении только ведутся^{11,12,13}, но до конечного массового выпуска подобных ПТС далеко. Учитывая важность рассматриваемого вопроса и необходимость повышения эффективности работы ГПТРС, в настоящий момент представляется возможным реализовать приведенную на рисунке 7 интеллектуальную схему управления парком ПТС разной вместимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенная работа позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Значения коэффициента пассажиронапряженности в г. Мозыре распределены по закону «Обобщение экстремальных значений» и составляют 0,278 для 2019 г. и 0,271 для 2024 г. (см. таблицу 3).

2. За рассматриваемый период произошло значимое снижение коэффициента пассажи-

⁸ Веклич В.Ф. Повышение эффективности эксплуатации безрельсового электрического транспорта применением средств диагностирования и управления по системе многих единиц : автореф. дис. ... д-р техн. наук : 05.22.07 / В.Ф. Веклич; Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. М., 1990. 38 с.

⁹ Веклич В.Ф. Исследование троллейбусов с управлением по системе многих единиц: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 442 / В.Ф. Веклич; Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. М., 1969. 25 с.

¹⁰ Веклич В.Ф. Эффективность применения троллейбусов с управлением по системе многих единиц / В.Ф. Веклич; Общество «Знание» Украинской ССР, Киевский дом научно-технической пропаганды. Киев, 1969. 19 с.

¹¹ Busplaner [Электронный ресурс]: ÖPNV: Zehn neue Buszüge für München. Режим доступа: <https://www.busplaner.de/de/news/busanhaenger-und-buszuege-wie-gepaeckanhaenger-personenanhaenger-und-sonstige-anhaenger-linienverkehr-oeffentlicher-personennahverkehr-oepnv-oepnv-unternehmen-oepnv-zehn-neue-buszuege-fuer-muenchen-8384.html> (дата обращения: 19.12.2023).

¹² Next [Электронный ресурс]: Next scenarios. Режим доступа: <https://www.next-future-mobility.com/copy-of-home-1> (дата обращения: 19.12.2023).

¹³ A research platform for Singapore [Электронный ресурс]: Towards the Ultimate Public Transport System. Режим доступа: <https://www.tum-create.edu.sg/content/towards-ultimate-public-transport-system-0> (дата обращения: 19.12.2023).

ронапряженности на маршрутах г. Мозыря (см. рисунок 1).

3. Установлено значимое изменение коэффициента пассажиронапряженности по маршрутам работы автобусов и по часам суток (см. рисунки 2, 3).

4. Имеется несоответствие вместимости автобусов, выполняющих перевозки рейсовым значениям пассажиронапряженности (см. рисунки 4, 5), что предопределяет низкие значения окупаемости работы ГПТРС.

Предложена новая технология организации работы ГПТРС (см. рисунок 7), подразумевающая: оснащение парка ПТС датчиками подсчета пассажиропотока, разработку программного продукта, позволяющего определять пассажиронапряженность по каждому рейсу каждого маршрута и прогнозировать на каждый последующий день значения пассажиронапряженности по каждому рейсу каждого маршрута, а затем распределять парк ПТС с учетом минимизации разницы вместимости выполняющего рейс ПТС и пассажиронапряженности на этом рейсе.

Дальнейшие направления научных работ целесообразным будет сконцентрировать на разработке и апробации математической модели закрепления имеющегося парка ПТС разной вместимости за рейсами маршрутов с учетом максимизации степени использования вместимости ПТС, соблюдения режимов труда и отдыха и других фактов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mireia Gascon, Oriol Marquet, Esther Gràcia-Lavedan, Albert Ambrós, Thomas Götschi, Audrey de Nazelle, Luc Int Panis, Regine Gerike, Christian Brand, Evi Dons, Ulf Eriksson, Francesco Iacorossi, Ione Àvila-Palència, Tom Cole-Hunter, Mark J. Nieuwenhuisjen, What explains public transport use? Evidence from seven European cities. *Transport Policy*. 2020. Volume 99. pp. 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.009>.
2. Malik F.A., Bell M., Dala L. and Busawon K. Modelling transport emission of an out of town centre to achieve emission reduction targets. 2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1–7. DOI: 10.1109/EFEA49713.2021.9406268.
3. Komsta, Henryk, et al. The Role of City Public Transport in Creating the Mobility of Its Residents. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*. 2019. vol. 20, pp. 393–97. doi:10.24136/atest.2019.073.
4. Komsta, Henryk & Drożdziel, Paweł & Opielak, Marek. The role of city public transport in creating the mobility of its residents. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*. 2019. 20. pp. 393–397. 10.24136/atest.2019.073.
5. Das S. and Das P. Gupta, Role of Public Transport in Urban Mobility – A Case Study of Kolkata. 2013. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/299971852>. (Дата обращения: 24.06.2021).
6. Гринченко А.В., Маршкова М.В. Определение социально-экономической эффективности использования пассажирского транспорта // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2017. Том 11, № 2. С. 37–40.
7. Chatti, Walid & Soltane, Bassem & Turki, Abalala Impacts of Public Transport Policy on City Size and Welfare. *Networks and Spatial Economics*. 2019. 19. 10.1007/s11067-019-09451-y.
8. Martin P, Rogers CA Industrial location and public infrastructure. 1995. *J Int Econ* 39:335–351.
9. Basagaña X., Triguero-Mas M., Agis, D., Pérez N., Reche C., Alastuey A., et al., 2018. Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Sci. Total Environ.* 610–611, 1076–1082. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.263>.
10. Bauernschuster S., Hener T., Rainer H. When labor disputes bring cities to a standstill: the impact of public transit strikes on traffic, accidents, air pollution, and health. *Am. Econ. J. Econ. Policy*. 2017. 9. 1–37. Available at: <https://doi.org/10.1257/pol.20150414>.
11. Chen Y., Whalley A. Green infrastructure: the effects of urban rail transit on air quality. *Am. Econ. J. Econ. Policy*. 2012. 4, 58–97. Available at: <https://doi.org/10.1257/pol.4.1.58>.
12. Carrigan A., King R., Velasquez J.M., Raifman M., Duduta N., Social, Environmental and Economic Impacts of BRT Systems: Bus Rapid Transit Case Studies From Around the World. *EMBARQ, World Resour. Inst.* 2013.
13. Lichtman-Sadot S., Can public transportation reduce accidents? Evidence from the introduction of late-night buses in Israeli cities. *Reg. Sci. Urban. Econ.* 2019. 74, 99–117. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2018.11.009>.
14. Besser L.M., Dannenberg A.L. Walking to public transit. *Am. J. Prev. Med.* 2005. 29. 273–280. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ampre.2005.06.010>.
15. Chaix B., Kestens Y., Duncan S., Merrien C., Thierry B., Pannier B., et al., Active transportation and public transportation use to achieve physical activity recommendations? A combined GPS, accelerometer, and mobility survey study. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 2014. 11, 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12966-014-0124-x>.
16. Баринава Л.Д., Забалканская Л.Э. Роль городского общественного транспорта в достижении целей устойчивого развития Agenda 2030 // *Тенденции развития науки и образования*. 2018. № 43–8. С. 47–52. DOI 10.18411/lj-10-2018-193.
17. Аземша С.А., Капский Д.В. Статистическое исследование окупаемости работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // *Вестник Полоцкого гос. ун. Серия В. «Промышленность. Прикладные науки»*. 2020. № 11. С. 70–77.

18. Еремин С.В. Оптимизация структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта в общей многокритериальной постановке // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 1(76). С. 62–68. DOI 10.33979/2073-7432-2022-76-1-62-68. EDN MTNDWA.

19. Жуков А.И. Разработка и апробация методики оптимизации структуры парка автобусов по вместимости в условиях мегаполиса // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 72(14). С. 25–29. EDN QYRBGP.

20. Жуков А.И. Применение табличного редактора при решении задач распределения автобусов по маршрутам и оптимизации структуры парка на пассажирском автотранспортном предприятии. Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. № 8. С. 21–25. EDN REZUPN.

21. Еремин С.В. Интегрированное транспортное планирование в условиях перспективного территориального развития города // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 3(74). С. 109–114. DOI 10.33979/2073-7432-2021-74-3-109-114. EDN QVUVBX.

22. Якимов М.Р., Трофименко Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. 2-е изд. Пермь: Агентство РАДАР, 2022. 536 с. ISBN 978-5-6048401-0-8. EDN IRPVVJ.

23. Якимов, М.Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3(55). С. 107–113. DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113. EDN ESGEPA.

24. Корчагин В.А., Гринченко А.В. Распределение автобусов по маршрутам движения с учетом вреда окружающей среде // Аграрный научный журнал. 2015. № 9. С. 40–43. EDN UJURPN.

25. Рябов И.М., Кашманов Р.Я. Совершенствование организации обслуживания пассажиров на маршруте путем использования автобусов разной вместимости // Вестник СибАДИ. 2019; 16(3): 264–275. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-264-275>.

26. Аземша С.А. Разработка предложений по повышению эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2019;16(5):544–557. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-5-544-557>.

27. Caio Ponte. Traveling heterogeneity in public transportation / Caio Ponte, Hygor Piaget M. Melo, Carlos Caminha, Jos S. Andrade Jr., Vasco Furtado // <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6>

28. Adra N., Michaux J.L., Michel Andre Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport. Artemis – assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. Rapport de recherche. 2004, 31 p. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_-_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems

29. Azemsha S., Kapski D. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities // International Journal of Engineering Inventions. 2022. Volume 11, Issue 12. pp. 128–134 <https://ijejournal.com/papers/Vol11-Issue12/1112128134.pdf>

30. Аземша С.А., Янкович С.Ю., Петров А.И. Оценка потенциала повышения окупаемости работы городского пассажирского транспорта ежедневным прогнозированием пассажиронапряженности. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2023. (2). С. 41–49. <https://doi.org/10.52928/2070-1616-2023-48-2-41-49>

31. Аземша С.А. Обоснование оптимальной вместимости модуля в составе пассажирского транспортного средства для регулярных городских перевозок // Транспорт Урала. 2023. № 2(77). С. 71–78. DOI 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78. EDN RMSUJJ.

REFERENCES

1. Mireia Gascon, Oriol Marquet, Esther Gràcia-Lavedan, Albert Ambròs, Thomas Götschi, Audrey de Nazelle, Luc Int Panis, Regine Gerike, Christian Brand, Evi Dons, Ulf Eriksson, Francesco Iacrossi, Ione Àvila-Palència, Tom Cole-Hunter, Mark J. Nieuwenhuisen, What explains public transport use? Evidence from seven European cities. *Transport Policy*. 2020; 99:362–374. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.009>.

2. Malik F.A., Bell M., Dala L. and Busawon K. Modelling transport emission of an out of town centre to achieve emission reduction targets. *2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Sofia, Bulgaria, 2021: 1–7. doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406268.

3. Komsta Henryk, et al. The Role of City Public Transport in Creating the Mobility of Its Residents. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*. 2019; vol. 20: 393–97. doi:10.24136/atest.2019.073.

4. Komsta, Henryk & Drożdżel, Paweł & Opielak, Marek. The role of city public transport in creating the mobility of its residents. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*. 2019; 20: 393–397. 10.24136/atest.2019.073.

5. Das S. and Das P. Gupta, Role of Public Transport in Urban Mobility – A Case Study of Kolkata. 2013. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/299971852>. (accessed: 24.06.2021).

6. Grinchenko A.V., Marshkova M.V. Determination of socio-economic efficiency of passenger transport use. *TT-Comm – peer-reviewed scientific journal*. 2017; Vol. 11. no. 2: 37–40. (in Russ.)

7. Chatti, Walid & Soltane, Bassem & Turki, Abalala Impacts of Public Transport Policy on City Size and Welfare. *Networks and Spatial Economics*. 2019. 19. 10.1007/s11067-019-09451-y.

8. Martin P, Rogers CA Industrial location and public infrastructure. *J Int Econ*. 1995.39:335–351.

9. Basagaña X., Triguero-Mas M., Agis, D., Pérez N., Reche C., Alastuey A., et al., 2018. Effect of public transport strikes on air pollution levels in

Barcelona (Spain). *Sci. Total Environ.* 610–611, 1076–1082. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.263>.

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

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

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

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

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

15. Chaix B., Kestens Y., Duncan S., Merrien C., Thierry B., Pannier B., et al., Active transportation and public transportation use to achieve physical activity recommendations? A combined GPS, accelerometer, and mobility survey study. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 2014; 11: 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12966-014-0124-x>.

16. Barinova L.D., Zabalkanskaya L.E. The role of urban public transport in achieving the Sustainable Development Goals Agenda 2030. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya.* 2018; 43-8: 47–52. DOI 10.18411/lj-10-2018-193. (in Russ.)

17. Azemsha S., Kapskiy D. Statistical study of return of work city passenger transport regular messages. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences.* 2020; (11): 70–77. (in Russ.)

18. Eremin S.V. Optimisation of the rolling stock structure of the urban passenger transport in a general multi-criteria formulation. *World of transport and technological machines.* 2022; 1(76):62–68. (in Russ.) DOI 10.33979/2073-7432-2022-76-1-62-68. EDN MTNDAW.

19. Zhukov A.I. Development and approbation of the methodology for optimising the bus fleet structure by capacity in the conditions of a megacity. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal.* 2013; 7-2(14): 25–29. EDN QYRBGP.

20. Zhukov A.I. Application of the tabular editor in solving the problems of buses distribution on routes and optimisation of the fleet structure at the passenger motor transport enterprise. *Gruzovoe i passazhirskoe avtohozajstvo.* 2013; 8: 21–25. (in Russ.) EDN REZUPN.

21. Eremin S.V. Integrated transport planning in the conditions of perspective territorial development of the city. *World of transport and technological machines.* 2021; 3(74): 109–114. (in Russ.) DOI 10.33979/2073-7432-2021-74-3-109-114. EDN QVUVBX.

22. Yakimov M.R., Trofimenko Y.V. Transport planning: formation of effective transport systems of large cities. Perm: Radar Agency, 2022. 536 p. (in Russ.) EDN IRPVVJ.

23. Yakimov M.R. Approaches to formation of an effective route network of large cities. *Herald of the Ural State University of Railway Transport.* 2022; 3(55): 107–113. (in Russ.) DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113. EDN ESGEPA.

24. Korchagin V.A., Grinchenko A.V. Distribution of buses on traffic routes taking into account environmental damage. *Agrarian Scientific Journal.* 2015; 9: 40–43. (in Russ.) EDN UJURPN.

25. Ryabovbov I.M., Kashmanov R.Ya. IMPROVING THE ORGANIZATION OF PASSENGER SERVICE ON THE ROUTE BY USING BUSES OF DIFFERENT CAPACITY. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2019; 16(3): 264–275. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-264-275>

26. Azemsha S.A. Development of proposals to improve the efficiency of public urban passenger transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2019; 16(5): 544–557. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-5-544-557>

27. Caio Ponte. Traveling heterogeneity in public transportation / Caio Ponte, Hygor Piaget M. Melo, Carlos Caminha, Jos S. Andrade Jr., Vasco Furtado. Available at: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6>

28. Adra N., Michaux J.L., Michel Andre Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport. *Artemis - assessment and reliability of transport emission models and inventory systems.* Rapport de recherche. 2004, 31 p. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_-_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems

29. Azemsha S., Kapski D. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities // *International Journal of Engineering Inventions.* 2022; Volume 11, Issue 12: 128–134 <https://ijejournal.com/papers/Vol11-Issue12/1112128134.pdf>

30. Azemsha S., Yankovich S., Petrov A. Evaluation of the potential to increase return on work urban passenger transport daily passenger volume forecast. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences.* 2023; (2): 41–49. (in Russ.) <https://doi.org/10.52928/2070-1616-2023-48-2-41-49>

31. Azemsha S.A. Justification of the optimal capacity of the module in the passenger vehicle for regular urban transportation. *Transport of the Urals.* 2023; 2(77):71–78. DOI 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78. EDN RMSUJJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой управления автомобильными перевозками и дорожным движением Белорусского государственного университета транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, **SPIN-код:** 6898-2383, e-mail: s-azemsha@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Sergei A. Azemsha – Cand. of Sci., Associate Professor, the Head of the Road Transport and Traffic Management Department, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, 34, Kirov str.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, **SPIN-code:** 6898-2383, e-mail: s-azemsha@yandex.ru

Научная статья
УДК 656
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-412-421>
EDN: SLVGXA



ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВМЕСТИМОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А.В. Колин, П.В. Рыбаков ✉, Н.Ю. Евреенова
Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва, Россия
✉ ответственный автор,
rybakov.sc@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях роста автомобилизации существенно возрастает необходимость в повышении качества обслуживания пассажиров общественным транспортом. Определяющим фактором для нахождения расчётной вместимости транспортных средств (ТС) является комфортность, предоставляемая пассажирам. С одной стороны, для того, чтобы общественный транспорт был популярным в сравнении с личным автомобильным транспортом, он должен обеспечивать комфортные условия проезда, которые обеспечиваются предоставлением свободных мест для сидения и (или) наличием достаточного пространства при проезде стоя. С другой стороны, гарантированное обеспечение всех пассажиров сидячими местами с комфортным «шагом» между рядами сидений требует увеличения количества транспортных средств для освоения того же объёма перевозок и может привести к резкому росту себестоимости перевозки и тарифа на проезд, при которых экономические преимущества общественного транспорта перед личным будут менее очевидными. Цель исследования заключалась в поиске компромиссной расчётной заполняемости транспортных средств, при которой общественный транспорт обеспечивает необходимую привлекательность и комфортность для пассажиров, а также требуемую провозную способность.

Материалы и методы. Методологической основой работы являлись общенаучные принципы и методы исследования: эмпирические (экспертная оценка) и теоретические (анализ, синтез, систематизация) методы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1. Произведён анализ методов определения качества заполняемости салона транспортного средства. 2. Определена максимальная приемлемая вместимость рассмотренных транспортных средств общественного транспорта. 3. Даны предложения по применению расчётного показателя плотности размещения стоящих пассажиров при определении провозной способности общественного транспорта.

Обсуждение и заключение. Проведённый анализ руководств по эксплуатации, ремонту, действовавших в соответствующие периоды эксплуатации выбранных транспортных средств, показывает, что вместимость транспортных средств, согласно нормативам производителей транспортных средств, и социальный стандарт Минтранса не позволяют достичь необходимого качества перевозок. Выполненное исследование позволило установить комфортный для пассажира уровень заполняемости транспортных средств и расчётный показатель плотности размещения стоящих пассажиров.

Практическая значимость. Установленную комфортную для пассажиров заполняемость транспортных средств можно использовать при разработке и актуализации социальных стандартов Министерства транспорта РФ.

Оригинальность. Произведена оценка условий проезда в зависимости от заполняемости салона пассажирами в разных типах транспортных средств общественного транспорта, эксплуатируемых в Российской Федерации и Республике Беларусь.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трамвай, троллейбус, автобус, заполняемость транспортных средств, вместимость салона транспортных средств, общественный транспорт

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 04.06.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Колин А.В., Рыбаков П.В., Евреенова Н.Ю., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Колин А.В., Рыбаков П.В., Евреенова Н.Ю. Особенности определения вместимости транспортных средств наземного городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 412-421. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-412-421>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-412-421>

EDN: SLVGXA

PECULIARITIES OF DETERMINING THE CAPACITY OF LAND URBAN PASSENGER TRANSPORTATION VEHICLES

Aleksei V. Kolin, Pavel V. Rybakov ✉, Nadezhda Y. Evreenova

Russian University of Transport (MIIT),

Moscow, Russia

✉ corresponding author,

rybakov.sc@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. In the conditions of motorization growth the necessity to improve the quality of passenger service by public transport increases significantly. The determining factor for finding the design capacity of vehicles (TC) is the comfort provided to passengers. On the one hand, in order for public transport to be popular in comparison with private motor transport, it must provide comfortable travel conditions, which are ensured by the provision of free places for sitting and (or) the availability of sufficient space for standing. On the other hand, guaranteed provision of all passengers with seats with a comfortable interval between rows of seats, requires an increase in the number of vehicles to master the same volume of transportation and can lead to a sharp increase in the cost of transportation and fare, at which the economic advantages of public transport over private transport will be less obvious. The aim of the study was to find a compromise calculated occupancy rate of vehicles, at which public transport provides the necessary attractiveness and comfort for passengers and the required carrying capacity.

Materials and methods. The methodological basis of the work was general scientific principles and research methods: empirical (expert evaluation) and theoretical (analysis, synthesis, systematization) methods. In order to achieve the set goal, the following tasks were solved: 1. The methods of determining the quality of occupancy quality of the vehicle interior were analyzed. 2. The maximum acceptable capacity of the considered public transportation vehicles was determined. 3. The proposals on the use of the calculated indicator of the density of standing passengers placement in determining the carrying capacity of public transportation are given.

Discussion and conclusion. The conducted analysis of manuals on operation, repair, acting in corresponding periods of operation of the chosen vehicles shows that the capacity of vehicles according to norms of manufacturers of vehicles and social standard of the Ministry of Transport does not allow to reach the necessary quality of transportation. The performed research has allowed to establish a comfortable level of occupancy of vehicles for a passenger and a calculated indicator of the density of standing passengers.

Practical significance. The established comfortable for passengers occupancy of vehicles can be used in the development and updating of social standards of the Ministry of Transport of the Russian Federation.

Originality. There is an assessment of the travel conditions depending on passenger occupancy in different types of public transport vehicles operated in the Russian Federation and the Republic of Belarus.

KEYWORDS: streetcar, trolleybus, bus, vehicle occupancy, vehicle cabin capacity, public transport

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 22.04.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Kolin A.V., Rybakov P.V., Evreenova N.Y. Peculiarities of determining the capacity of land urban passenger transportation vehicles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 412-421. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-412-421>

© Kolin A.V., Rybakov P.V., Evreenova N.Y., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Активные процессы урбанизации генерируют проблемы создания благоприятной внешней среды для значительной части населения, сосредоточенной на ограниченной городской территории. Решение этих проблем лежит в плоскости создания такой системы услуг, которая покрывала бы все потребности населения и гарантировала устойчивость развития. Изменение роли наземного городского пассажирского транспорта в городской среде делает необходимым рассмотрение при проектировании городского пассажирского транспорта не только технологических и организационных решений, но и определения качества предоставляемых услуг.

Завышенная вместимость транспортных средств и цена проезда негативно влияют на качество предоставляемых услуг пассажирскими транспортными перевозочными предприятиями. Также очевидно, что с увеличением продолжительности поездки доля пассажиров, желающих непременно ехать сидя, увеличивается. Если не учитывать эти пожелания пассажиров, то будет наблюдаться массовый отказ от пользования общественным транспортом и рост автомобилепользования.

Цель исследования заключалась в поиске компромиссной расчётной заполняемости транспортных средств, при которой общественный транспорт обеспечивает необходимую привлекательность и комфортность для пассажиров и требуемую провозную способность.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1. Произведён анализ методов определения качества заполняемости салона транспортного средства. 2. Определена максимальная приемлемая вместимость рассмотренных транспортных средств общественного транспорта. 3. Даны предложения по применению расчётного показателя плотности размещения стоящих пассажиров при определении провозной способности общественного транспорта.

Определение комфортной для пассажиров заполняемости транспортных средств позволит скорректировать социальные стандарты Минтранса для повышения качества обслуживания в общественном транспорте.

В трудах ряда авторов были изучены методы определения качества заполняемости салона транспортного средства. В работах [1, 2, 3] рассмотрено влияние заполняемости салонов транспортных средств на предпочтения пассажиров в части выбора общественного транспорта.

В работе [1] утверждается, что пассажиры в целом ценят отсутствие скученности больше, чем экономию времени нахождения в пути. Причём восприятие скученности происходит субъективно. Оно определяется не средним заполнением транспортного средства в целом, а наличием соседей в непосредственной близости от себя [4, 5, 6].

В работе [2] пассажиры разделены на категории в зависимости от чувствительности к переполнению салона. Указывается, что наиболее чувствительными к переполненности салона являются пожилые люди, путешественники и люди с низким уровнем дохода. Пассажиры, следующие в поездах метрополитена, более лояльны к скученности, чем пассажиры наземного городского пассажирского транспорта, так как метрополитен обладает большей скоростью сообщения. Собственные совокупные затраты с учётом транспортной усталости при проезде стоя по сравнению с проездом в сидячем положении пассажиры оценивают следующим образом: в Сантьяго и Париже на 10% от общих затрат [7], в Гонконге на 15–27% [8], в Лондоне на 44%¹, в Сингапуре на 24% [9].

В работе [3] установлено, что при стоимости проезда в автобусе 2 юаня пассажиры готовы переплачивать 6,2 юаня за сокращение продолжительности поездки на 1 ч в свободном автобусе и 12,8 юаня за сокращение продолжительности поездки на 1 ч в переполненном автобусе. Результаты анкетирования анализировались с помощью смешанной логит-модели [10].

Известны также другие многочисленные исследования оценки стоимости заполняемости в транспортном средстве и её влияние на выбор пассажиров [11, 12, 13, 14, 15].

Однако в вышеуказанных работах не были решены поставленные нами задачи.

¹ Whelan, G. and Crockett, J. An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. In Proceedings of the 1st International Choice Modelling Conference, 2009. Harrogate, England.

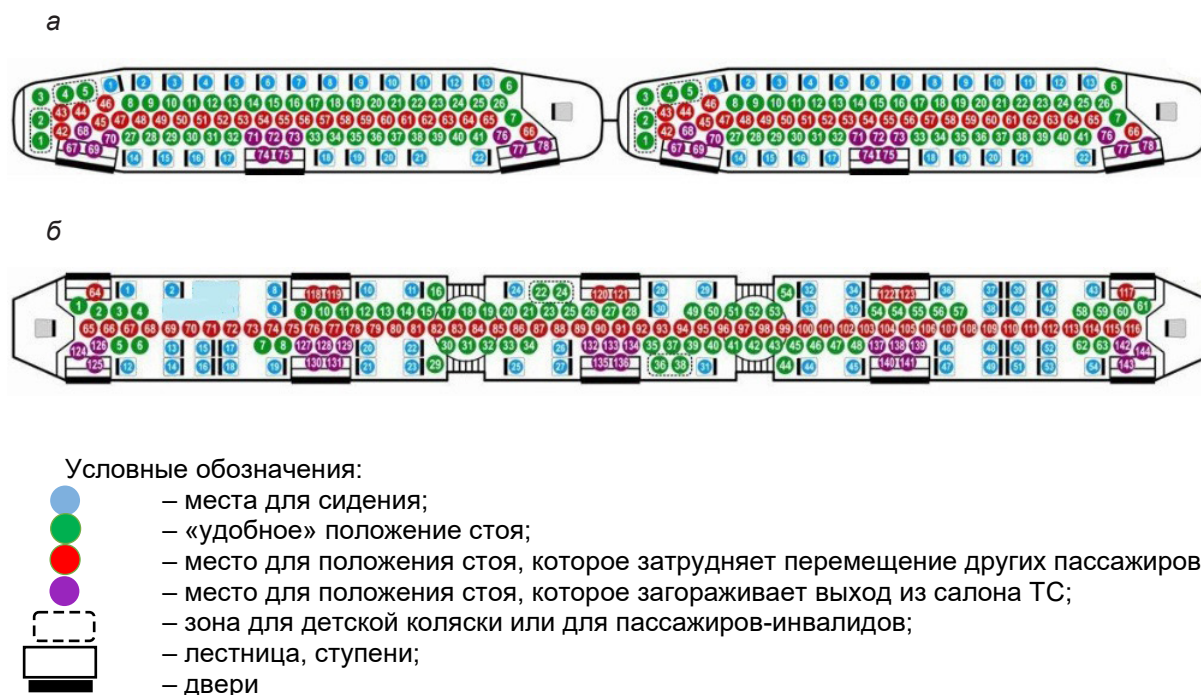


Рисунок 1 – Схема размещения пассажиров по категориям мест:
а – двухвагонный поезд из трамвайных вагонов Татра Т-3 (Т6);
б – сочленённый трехсекционный трамвайный вагон КТ8Д5
Источники: составлено авторами [17, 18].

Figure 1 – Scheme of passenger accommodation by seat categories:
а) Two-car train of Tatra T-3 (T6) streetcar cars;
б) Articulated three-section tramcar KT8D5
Sources: compiled by the authors [17, 18].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВМЕСТИМОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

На рисунке 1 представлены схемы размещения пассажиров в салонах трамваев Т-3 и КТ-8Д5², разработанные дизайнерами предприятия ЧКД-Прага³ [16]. Трамваи серии Т-3 эксплуатировались во многих городах СССР и России и находятся в эксплуатации до сих пор (в Екатеринбурге, Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Краснодаре, Барнауле, Ижевске, Уфе, Орле, Курске и др.). Трамвай серии КТ-8Д5 эксплуатировался в Волгограде. На данных схемах пассажиро-места разделены по следующей градации:

- места для сидения;
- «удобное» положение стоя;
- места для положения стоя, которые затрудняют перемещение других пассажиров;
- места для положения стоя, которые загромождают выход из салона.

Как видно из рисунка 1, а в двухвагонном поезде, состоящем из трамвайных вагонов Татра Т-3 (Т6), 44 места (22% общей максимальной возможной ёмкости) являются местами для сидения и ещё 82 места (41% ёмкости) являются удобными стоячими местами. Остальные стоячие места затрудняют перемещение других пассажиров (таких 50 ед., 25% ёмкости) и затрудняют перемещение других пассажиров на входе-выходе (таких 24 ед., 12% ёмкости).

² Vladimír Kraus. Příručka řidiče tramvaje KT8D5. Dopravní podnik hl. m. Prahy. Praha, 1987, 81 p.

³ Информация с сайта <https://subrt.blog.idnes.cz/> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://subrt.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=154515> (дата обращения: 25.12.2023).



Рисунок 2 – Схема размещения пассажиров по категориям мест в трамвае БКМ-621
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of passengers placement by seat category in БКМ-621 streetcar
Source: compiled by the authors.

Кроме того, в вагонах трамвайного поезда имеется 4 зоны для детских колясок, которые учтены как зоны для размещения 8 комфортно стоячих пассажиров.

На рисунке 1, б представлен сочленённый трехсекционный трамвайный вагон КТ8Д5 с 54 (27% ёмкости) сидячими местами и 63 (32% ёмкости) стоячими удобными местами. Стоячих мест, которые затрудняют перемещение других пассажиров: 60 ед. (30% ёмкости), а стоячих мест, которые затрудняют перемещение других пассажиров на лестнице: 21 ед.

(11% ёмкости). Имеется две зоны для детских колясок, в которых можно разместить 4 стоячих пассажиров с удобством.

Авторами разработаны схемы размещения пассажиров по аналогичным выделенным категориям мест в некоторых типах транспортных средств общественного транспорта, эксплуатируемых в Российской Федерации и Республике Беларусь, а именно: трамвай КТМ-8 (71-608)⁴, троллейбус БКМ-321⁵, троллейбус ПКТС-6281⁶, трамвай БКМ-621⁷, автобус ЛиАЗ-5292⁸, автобус ЛиАЗ-6213.21⁹,

⁴ Трамвайный вагон 71-608К. Техническое описание, инструкция по эксплуатации. Выходные данные не указаны. УКВЗ, 1990-е гг., 71 с.

⁵ Троллейбус пассажирский модели 321 для г. Санкт-Петербурга. Руководство по эксплуатации. ОАО Управляющая компания холдинга «БЕЛКОММУНМАШ», Минск, 244 с.

⁶ Троллейбус пассажирский низкопольный ПКТС-6281 «Адмирал». Руководство по эксплуатации. Том 2, часть 2. ООО ПК «Транспортные системы», Москва, 222 с.

⁷ Вагон трамвайный пассажирский модели 62103. Руководство по эксплуатации. ОАО Управляющая компания холдинга «БЕЛКОММУНМАШ», Минск, 96 с.

⁸ Низкопольный автобус ЛиАЗ-529222. Краткое руководство по эксплуатации. ООО «Ликийский Автобусный Завод», Москва, 134 с.

⁹ Сочленённый низкопольный автобус ЛиАЗ-621321. Руководство по эксплуатации. ООО «Ликийский Автобусный Завод», Москва. 2011, 397 с., с ил., табл.

автобус МАЗ-2031¹⁰, автобус МАЗ-206¹¹, автобус МАЗ-216¹², автобус МАЗ-103.5¹³. Схемы размещения пассажиров по категориям мест в транспортных средствах, эксплуатируемых в РФ и РБ, составлялись согласно эмпирическим методам:

1) наблюдение за поведением пассажиров в салонах выбранных ТС;

2) сравнение заполняемости салона в разное время суток, разные дни недели, разные дни в году (праздники, рабочие дни, выходные), разные времена года.

Такие эксперименты позволили исследовать свойства объектов действительности (людей в салоне выбранных ТС) в описанных выше условиях. На рисунке 2 представлена схема салона трамвая БКМ-621 – одного из рассматриваемых ТС, эксплуатируемых в РФ и РБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно рисунку 1, а полная максимальная вместимость двухвагонного трамвайного поезда Татра Т-3 составляет 200 мест, а в сочленённом трёхсекционном трамвайном вагоне КТ8Д5 (рисунок 1, б) полная максимальная вместимость составляет 198 мест.

В рассмотренных трамвайных вагонах Татра Т-3 и КТ8Д5 только соответственно 63 и 59% мест от полной (максимально возможной) вместимости соответственно являются приемлемыми для более-менее комфортного проезда пассажиров.

Вместе с тем следует констатировать, что применение норм в 3; 5; 8 и 10 чел/м² по размещению пассажиров на свободной площади салона транспортных средств необъективно отражает вместимость транспортных средств, так как не учитывается характер размещения пассажиров относительно друг друга с учётом очертаний салона.

В соответствии с Распоряжением Министерства транспорта РФ от 13 апреля 2018 г. № НА-55-¹⁴ (пункт 3.3.4) «фактическая наполненность транспортного средства, используемого для осуществления перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по муниципальным и межмуниципальным маршрутам регулярных перевозок составляет не более трех человек на 1 кв. м свободной площади пола салона транспортного средства, предусмотренной для размещения стоящих пассажиров». В то же время производители транспортных средств обычно указывают их вместимость, исходя из размещения стоящих пассажиров в расчёте 5 чел/м². Так, в соответствии с Методологическими положениями по статистике транспорта¹⁵, общая пассажировместимость автобусов определяется путем умножения количества автобусов по типам на их вместимость в соответствии с техническим паспортом из расчета 5 чел. на 1 кв. м свободной площади пола плюс места для сидения.

На рисунке 2 представлено размещение пассажиров по категориям мест в соответствии с габаритами салона, выступающих частей и размещением сидений, а также учитывает антропометрические характеристики людей. На основании рисунка 2 составлена таблица, в которой представлены расчёты абсолютных и относительных значений вместимости транспортных средств при различных уровнях наполняемости. Выделены три уровня наполняемости:

«зелёный» – заняты все сидячие места, плюс места для удобного положения стоя;

«красный» – заняты все сидячие места, плюс места для удобного положения стоя и все стоящие места, которые затрудняют проход по салону;

¹⁰ Автобусы МАЗ 203. Руководство по эксплуатации 203065. ООО «МАЗ», Минск, 2016, 126 с.

¹¹ Автобусы МАЗ 206 и МАЗ 226. Руководство по эксплуатации. ООО «МАЗ», Минск, 2022, 147 с.

¹² Автобус МАЗ 216. Руководство по эксплуатации. ООО «МАЗ», Минск, 2020, 234 с.

¹³ Автобусы МАЗ 103 и МАЗ 107. Руководство по эксплуатации. ООО «МАЗ», Минск, 2017, 165 с.

¹⁴ Распоряжение Министерства транспорта РФ от 13 апреля 2018 г. № НА-55-р «О внесении изменений в социальный стандарт транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом, утвержденный распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 г. № НА-19-р»

¹⁵ «МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО СТАТИСТИКЕ ТРАНСПОРТА» утверждённые приказом Росстата от 29 декабря 2017 г. № 887.

«фиолетовый» – заняты все сидячие места, плюс все стоящие места, включая места, которые загораживают входы – выходы из транспортного средства (максимально возможная, но не комфортная величина заполняемости).

Как видно из таблицы, при максимально возможной вместимости транспортных средств плотность размещения стоящих пассажиров не может превышать 5,2 чел/м². При «красном» уровне заполнения плотность размещения пассажиров составляет 3,1–4,8 чел/м². А при «зелёном» уровне заполнения плотность размещения составляет 1,2–1,7 чел/м². Таким образом, комфортным уровнем следует считать заполнение, при котором плотность размещения стоящих пассажиров составляет не более 1,7 чел/м². А при плотности размещения стоящих пассажиров свыше 3–4 чел/м² условия проезда следует считать неприемлемыми. То есть при определении провозной способности транспортных коммуникаций расчётный показатель плотности размещения стоящих пассажиров не должен превышать 3,5 чел/м².

Исследование показало, что заполняемость таких категорий как «место для положения стоя, которое затрудняет перемещение других пассажиров» и «место для положения стоя, которое загораживает выход из салона ТС» происходит равномерно. Интенсивность заполнения категории «места для сидения» имеет меньшее значение при свободности более 80% количества «удобных» положений стоя, по сравнению с интенсивностью заполнения «места для сидения» при свободности менее 20% количества «удобных» положений стоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные транспортные системы городов в своем развитии должны удовлетворять тенденции общественного развития и соответствовать критериям сбалансированного (устойчивого) развития. Для поддержания требуемого уровня мобильности необходимо увеличивать долю поездок на общественном транспорте в общем объеме перемещений.

Согласно проведённым наблюдениям за поведением пассажиров в салонах выбранных транспортных средств и расчётам, компромиссная плотность размещения стоящих пассажиров в транспортных средствах, эксплуатируемых в РФ и РБ, обеспечивающая комфортные условия проезда, составляет от 1,2 до 1,7 чел/м².

Это значительно меньше рекомендуемых значений Распоряжением Министерства транспорта РФ и Методологических положений по статистике транспорта, устанавливающих в качестве комфортной плотность размещения стоящих пассажиров в 3–3,5 чел/м².

В то же время максимальная расчётная плотность размещения (при «фиолетовом» уровне заполнения) для различных транспортных средств составляет 4,9–5,6 чел/м², что значительно меньше величины, заявляемой некоторыми производителями транспортных средств общественного пассажирского транспорта (8 чел/м²).

Существующие стандарты по количеству размещаемых в салоне пассажиров не обеспечивают комфортные условия поездки, т.к. плотность размещения пассажиров по паспортным характеристикам ТС часто превышает допустимую вместимость ТС.

Размещение стоящих пассажиров ТС выше 6 чел/м² маловероятно ввиду влияния отклонений от среднестатистических значений размерности телосложения человека, багажа, верхней одежды и других личных предметов или оборудования, а также в расчёт принята возможность человека держаться руками за поручни при поездке и стоять боком по направлению движения, чтобы уменьшить прилагаемое усилие на ноги для удержания равновесия при разгонах и замедлениях ТС.

Величины плотности размещения пассажиров в салонах транспортных средств, обеспечивающие комфортные условия проезда или максимальную вместимость, для каждого вида ТС должны устанавливаться индивидуально с учётом их планировки, антропологических характеристик стоящих пассажиров и их поведения.

Таблица
Определение абсолютной и относительной вместимости транспортных средств
при различных уровнях наполняемости
Источник: составлено авторами.

Table
Determination of absolute and relative vehicle capacity at different occupancy levels
Source: compiled by the authors.

Модель	Трамвай КТМ-8		Трамвай БКМ-62103		Трамвай Татра Т3 (Т6) (двухвагонный состав) - *		Трамвай КТ8D5 (сочленённый трёхсекционный вагон)		Троллейбус БКМ-321		Троллейбус ПКТС-6281	
	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²
Уровень наполняе- мости												
Только сидячие места	32	0	29	0	44	0	54	0	26	0	34	0
«Зелёный»	72	1,4	63	1,7	126	4,0	117	1,6	40	1,2	48	1,3
«Красный»	136	3,6	119	4,5	176	6,5	177	3,1	68	3,5	78	4,0
«Фиолетовый»	171	4,9	137	5,4	200	7,6	198	3,6	85	4,9	91	5,2

Продолжение таблицы

Модель	Автобус МА3-2031XX		Автобус МА3-206		Автобус МА3-216		Автобус МА3-1035		Автобус ЛиАЗ 5292.22		Автобус ЛиАЗ 6213.21	
	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²	Места	Чел/м²
Уровень наполняемости												
Только сидячие места	36	0	27	0	40	0	33	0	20	0	32	0,0
«Зелёный»	49	1,3	40	1,5	67	1,4	46	1,4	35	1,3	58	1,3
«Красный»	83	4,6	64	4,2	119	4,2	78	4,8	66	4,0	115	4,1
«Фиолетовый»	91	5,3	77	5,7	137	5,1	85	5,6	84	5,6	143	5,5

* - вместимость определена производителем «ЧКД – Прага» в соответствии с принятыми антропологическими размерами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Zheng Li., David A. Hensher Crowding in Public Transport: A Review of Objective and Subjective Measures Author links open overlay panel. *Journal of Public Transportation*. April 2013; Volume 16, Issue 2: 107–134.
2. Tirachini A., Hurtubia R., Dekker T. Estimation of crowding discomfort in public transport: results from Santiago de Chile. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017; 103: 311–326.
3. Minhua Shao, Congcong Xie, Tianye Li, Lijun Sun Influence of in-vehicle crowding on passenger travel time value: Insights from bus transit in Shanghai, China. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022; 11: 665–677.
4. Turner S., E. Corbett, R. O 'Hara, and J. White. Health and safety effects of rail crowding: Hazard identification. 2004. HSL Report RAS/04/12.
5. Cox T., J. Houdmont, A. A. Griffiths Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain. *Transportation Research Part A–Policy and Practice*. 2006; 40(3): 244–258.
6. Mohd Mahudin N.D., T. Cox, A. Griffiths Measuring rail passenger crowding: Scale development and psychometric properties. *Transportation Research Part F*. 2012; 15(1): 38–51
7. Kroes E., Kouwenhoven M., Debrincat, L., and Pauget, N. Value of crowding on public transport in Île-de-France, France. *Transportation Research Record*. 2014; 2417: 3745.
8. Hörcher D., Graham D. J., and Anderson R. J. Crowding cost estimation with large scale smart card and vehicle location data. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 95: 105 – 125.
9. Tirachini A., Sun L., Erath A., and Chakirov A. Valuation of sitting and standing in metro trains using revealed preference. *Transport Policy*. 2016; 47:94104.
10. Hensher D.A., Greene W.H. The mixed logit model: the state of practice. *Transportation*. 2003; T. 30: 133–176.
11. Qin, F., 2014. Investigating the in-vehicle crowding cost functions for public transit modes. *Math. Problems Eng.* 2014, 1–13.
12. Hörcher, D., Graham, D.J., Anderson, R.J., Crowding cost estimation with large scale smart card and vehicle location data. *Transport. Res. Part B: Methodol.* 2017; 95, 105–125.
13. Sahu P.K., Sharma G., Guharoy A., Commuter travel cost estimation at different levels of crowding in a suburban rail system: a case study of Mumbai. *Public Transport*. 2018.10, 379–398.
14. Lu H., Fowkes T., Wardman M., Amending the incentive for strategic bias in stated preference studies. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board* 2008; 2049: 128–135.
15. Batarce, M., Muñoz, J.C., de Dios Ortúzar, J., Raveau, S., Mojica, C., Ríos, R.A., 2015. Use of mixed stated and revealed preference data for crowding valuation on public transport in Santiago, Chile. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board* 2535, 73–78.

16. Petr Šohajek, Konstrukce vozidel veřejné hromadné dopravy. Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola dopravní. Praha. 2011: 60.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Коллин А.В. Сбор и анализ первичных данных по заполняемости салонов выбранных ТС. Определение абсолютной и относительной вместимости ТС при различных уровнях наполняемости. Поиск и анализ методов определения качества заполнения салона транспортного средства. Предложения по применению расчетного показателя плотности размещения стоящих пассажиров при определении провозной способности общественного транспорта.

Рыбаков П.В. Сбор и анализ первичных данных по заполняемости салонов выбранных ТС. Определение абсолютной и относительной вместимости ТС при различных уровнях наполняемости. Поиск и анализ методов определения качества заполнения салона транспортного средства.

Евреенова Н.Ю. Сбор и анализ первичных данных по заполняемости салонов выбранных ТС. Оформление материала статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kolin A.I.V. Raw data on the occupancy of the salons in selected vehicles collection and analysis. D Absolute and relative capacity of a vehicle at different levels of occupancy determination. Search and analysis of methods for determining the quality of vehicle interior occupancy. Proposals for the application of the calculated indicator of the density of standing passengers in determining the carrying capacity of public transport.

Rybakov P.V. Raw data on the occupancy of the salons in selected vehicles collection and analysis. Absolute and relative capacity of a vehicle at different levels of occupancy determination. Search and analysis of methods for determining the quality of vehicle interior occupancy.

Evreenova N. Yu. Raw data on the occupancy of the salons in selected vehicles collection and analysis. The layout of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коллин Алексей Валентинович – старший преподаватель кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальными системами Российского университета транспорта (МИИТ) (27994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8206-1656>, **SPIN-код:** 5721-8320, e-mail: alex5959@yandex.ru

Рыбаков Павел Валерьевич – ассистент кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальными системами Российского университета транспорта (МИИТ) (27994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4554-013X>, **SPIN-код:** 4822-3515 e-mail: rybakov.sc@mail.ru

Евреенова Надежда Юрьева – канд. техн. наук, доц. кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальными системами Российского университета транспорта (МИИТ) (27994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4616-4281>, **SPIN-код:** 4471-7850, e-mail: nevreenova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Kolin – Senior Lecturer of the Transportation Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT) (27994, GSP-4, Moscow, Obraztsova str. 9, p. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8206-1656>, **SPIN-code:** 5721-8320, e-mail: alex5959@yandex.ru

Pavel V. Rybakov – Assistant of the Transportation Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT) (27994, GSP-4, Moscow, Obraztsova str., 9, p. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4554-013X>, **SPIN-code:** 4822-3515 e-mail: rybakov.sc@mail.ru

Nadezhda Yu. Evreenova – Cand. of Sci., Associate Professor, Transportation Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT) (27994, GSP-4, Moscow, Obraztsova str., 9, p. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4616-4281>, **SPIN-code:** 4471-7850, e-mail: nevreenova@mail.ru

Научная статья

УДК 656.056.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434>

EDN: UAXSCA



СИТУАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В ЕРЕВАНЕ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

А.Т. Саргсян

Национальный университет архитектуры и строительства Армении,
мэрия Еревана РА,
г. Ереван, Армения
arman-sargsyan-97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассматривается актуальная проблема перегруженности дорожного движения в столице Армении, городе Ереване, и предлагается путь её решения с использованием автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД). Введение обозначает важность эффективного управления дорожным движением для обеспечения безопасности и комфорта горожан.

Материалы и методы. Анализ текущей ситуации поднимает вопросы о плотности транспортного потока, пробках, неэффективности дорожных ресурсов и их воздействии на экологию и качество жизни горожан. В свою очередь, рассмотрение АСУДД как решения включает объяснение концепции этой системы, её преимущества и успешные мировые примеры внедрения. План внедрения АСУДД включает этапы от сбора данных до управления движением, а также необходимые технические и инфраструктурные изменения. Оценка затрат и выгод подчеркивает экономическую и социальную составляющие предполагаемых результатов.

Выводы. Внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД) приводит к существенному сокращению задержек транспорта на перекрестках на 10–20%, что уменьшает расход бензина на передвижение на 30%. Количество дорожно-транспортных происшествий на перекрестках снижается на 10–15%. Это ведет к экономическим выгодам, повышению безопасности дорожного движения и улучшению экологической ситуации в городах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное движение, автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД), перегруженность, пробки, транспортный поток, безопасность, оптимизация, технические решения, городская мобильность, анализ данных

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 04.06. 2024.

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: Саргсян А.Т. Ситуация дорожного движения в Ереване и пути модернизации с помощью автоматизированной системы управления дорожным движением // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 422-434. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434>

© Саргсян А.Т., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434>
EDN: UAXSCA

TRAFFIC SITUATION IN YEREVAN AND WAYS TO MODERNIZE WITH THE HELP OF CURRENT PROBLEM OF TRAFFIC CONGESTION

Arman T. Sargsyan

National University of Architecture and Construction of Armenia,
Yerevan Municipality of RA,
Yerevan, Armenia
arman-sargsyan-97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. This article addresses the pressing issue of road traffic congestion in the capital of Armenia, Yerevan, and proposes a solution using the Automated Traffic Management System (ATMS). The introduction underscores the significance of effective traffic management in ensuring the safety and comfort of urban residents.

Materials and methods. The analysis of the current situation raises concerns about traffic density, congestion, inefficient use of road resources, and their impact on the environment and citizens' quality of life. In turn, the exploration of ATMS as a solution includes an explanation of the system's concept, its benefits, and successful global implementation examples. The implementation plan for ATMS encompasses stages from data collection to traffic management, along with necessary technical and infrastructural changes. The assessment of costs and benefits underscores the economic and social components of anticipated outcomes.

Conclusions. The introduction of automated traffic management systems (ATMS) leads to a significant reduction in transport delays at intersections by 10–20%, which reduces gasoline consumption for movement by 30%. The number of traffic accidents at intersections is reduced by 10–15%. This leads to economic benefits, improved road safety and improved environmental conditions in cities.

KEYWORDS: road traffic, Automated Traffic Management System (ATMS), congestion, traffic jams, traffic flow, safety, optimization, technical solutions, urban mobility, data analysis

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 20.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

Author 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: Sargsyan A.T. Traffic situation in Yerevan and ways to modernize with the help of current problem of traffic congestion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 422-434. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434>

© Sargsyan A.T., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Современный ритм жизни в Ереване, столице Армении, сопровождается одной из наиболее острых и актуальных задач – проблемой перегруженности дорог. За последние десятилетия город стал свидетелем стремительного роста числа автомобилей и населения, что, в свою очередь, увеличило интенсивность движения на его улицах. Неуправляемый рост автотранспорта стал источником регулярных заторов, затруднений и хаоса на дорогах.

Эффективное управление дорожным движением становится приоритетной задачей для обеспечения безопасности, комфорта и повышения качества жизни горожан. Проблемы в дорожном движении не только увеличивают стресс у водителей и пешеходов, но также оказывают негативное воздействие на окружающую среду из-за долгих пробок, выбросов вредных веществ и ухудшения атмосферного воздуха. При разработке решений для организации дорожного движения и управления транспортными системами во всем мире широко применяется интеллектуальная транспортная система (ИТС), которая позволяет эффективно управлять существующей дорожной сетью, учитывая её загруженность и пропускную способность [1, 2].

ИТС построена на основе последних достижений в информационных технологиях и системах связи, управлении, компьютерном оборудовании и программном обеспечении для повышения эффективности и безопасности автомобильного транспорта. Принципиальной особенностью таких систем является автоматическое (или минимальное участие оператора) формирование управляющих воздействий в режиме реального времени на элементы транспортной системы. Без сомнения, необходимо находить эффективные пути решения этой проблемы, и одним из перспективных подходов является внедрение системы автоматизированного управления дорожным движением (АСУДД) [3]^{1,2}.

Применение автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД) является важным этапом в создании и внедрении интеллектуальных транспортных систем (ИТС), особенно в контексте эффективного

управления светофорными объектами [4]. Существует несколько вариантов реализации АСУДД:

1. Статические светофорные объекты, где фазы рассчитываются на основе прогнозируемой нагрузки.

2. Адаптируемые по времени светофорные объекты, где фазы изменяются в определенные часы суток с учетом наибольшей транспортной активности, но остаются статичными из-за отсутствия обратной связи по реальным показателям интенсивности потоков.

3. Адаптируемые светофорные объекты с обратной связью по интенсивности транспортного потока.

4. Локальные АСУДД, объединенные в системы [5].

Научная новизна данной статьи заключается в следующем:

- Контекстуализация проблемы в региональном контексте. В данной статье акцент делается на анализе перегруженности дорожного движения в городе Ереване. Это имеет большое значение, так как проблемы управления дорожным движением могут сильно различаться в разных городах и странах, и решения, разработанные для Еревана, могут иметь уникальное значение и применение в данном контексте.

- Система АСУДД как инновационное решение. Предлагается рассмотрение АСУДД как эффективного средства решения проблемы перегруженности дорожного движения. Это представляет собой инновационный подход, так как такие системы не существуют в Ереване.

- Социально-экономические аспекты. В статье проводится оценка затрат и выгод от внедрения АСУДД, что подчеркивает важность данного исследования для принятия экономически обоснованных решений в сфере управления дорожным движением.

- Практическая реализация. План внедрения АСУДД описывает конкретные этапы, включая сбор данных, технические и инфраструктурные изменения. Это предоставляет практический план, который может быть использован в будущих проектах по улучшению дорожной инфраструктуры.

¹ Vuchic V. Transportation for livable cities. Routledge, 2017.

² Агуреев И.Е., Митюгин В.А., Фролов Н.А. Проблемы и перспективы развития автоматизированных систем управления дорожным движением // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: материалы Междунар. очно-заочной науч.-техн. конф. Тула: Тульский гос. ун-т, 2017. С. 304–310.

- Акцент на городской экологии и качестве жизни. Статья выделяет важность решения проблемы перегруженности дорожного движения не только для безопасности, но и для улучшения экологической обстановки и качества жизни горожан. Это добавляет социальный аспект к научной новизне статьи.

Все эти аспекты делают данную статью значимой и инновационной в контексте решения проблемы перегруженности дорожного движения в Ереване и, возможно, в других городах с похожими проблемами.

Анализ текущей ситуации

Обзор текущей инфраструктуры дорожного движения, дорожной сети и интенсивности транспортного потока в Ереване. Современная инфраструктура дорог в Ереване, несмотря на некоторые положительные моменты, столкнулась с серьезными вызовами, обусловленными быстрым ростом данного города. Высокая плотность жилых и коммерческих застроек оставляет ограниченное пространство для расширения дорожной сети. Из-за этого множество улиц и перекрестков страдают от недостатка пропускной способности в часы пик [6]³.

Анализ проблем, таких как заторы, перегруженность, неэффективное использование дорожных ресурсов. Постепенно усиливающиеся заторы и пробки на дорогах Еревана – это давно известные проблемы. Недостаточная координация движения и отсутствие системы управления создают ситуацию, когда дорожные ресурсы используются неэффективно. В периоды наибольшей нагрузки ситуация становится наиболее напряженной, что ведет к долгим задержкам и недовольству участников дорожного движения [7].

Оценка воздействия неблагоприятных условий дорожного движения на экологию, экономику и качество жизни горожан. Регулярные пробки и задержки в движении оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду и экологическую обстановку. Пробки, заторы приводят к увеличению выбросов вредных веществ, что в свою очередь ведет к ухудшению качества атмосферного

воздуха и негативно сказывается на здоровье горожан. Экономика также страдает от потери времени, энергии и ресурсов, затрачиваемых из-за заторов. Кроме того, недовольство жителей города неблагоприятными условиями дорожного движения влияет на их общее удовлетворение жизнью в этом мегаполисе.

Проблемы дорожного движения в Ереване оказывают сложное воздействие на различные аспекты жизни города и его жителей. Решение этих проблем требует комплексного подхода, в котором автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД) может сыграть ключевую роль в оптимизации транспортной инфраструктуры и обеспечении более эффективного и устойчивого движения.

АСУДД КАК РЕШЕНИЕ

Объяснение понятия автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) и её принципов работы. Автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД) представляет собой программно-аппаратное решение, разработанное с целью оптимизации и мониторинга движения на дорогах. Ее функциональность базируется на сборе данных, их анализе и последующем управлении дорожным движением, направленном на достижение наибольшей эффективности и безопасности в потоке транспорта [8, 9].

Описание успешных примеров внедрения АСУДД в других городах мира и их позитивного влияния на дорожное движение. Множество крупных мировых мегаполисов успешно внедрили АСУДД и достигли значительных положительных результатов. Например, такие мегаполисы, как Сингапур, Лондон, Токио и Барселона, демонстрируют более гладкое движение, сокращение времени в пути и уменьшение загруженности дорожной инфраструктуры. Опыт этих городов подтверждает, что внедрение АСУДД имеет потенциал улучшить дорожную ситуацию и сделать городское движение более эффек-

³ Hirt S., Stanilov K. Twenty Years of Transition. UN-HABITAT, 2009.

тивным и комфортным для жителей и посетителей^{4,5,6,7}.

SCOOT (Великобритания), UTOPIA (Италия), SCATS (Австралия), BALANCE (Германия) и СПЕКТР (Россия) считаются наиболее популярными автоматизированными системами управления дорожным движением последнего поколения, централизованными и децентрализованными^{8,9,10,11}.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) в Ереване станет решением проблем перегруженности и неэффективного дорожного движения, способствуя созданию более устойчивой и комфортной городской среды.

План внедрения АСУДД в Ереване [10]¹²:

1. Этапы внедрения АСУДД:

а) Сбор и обработка данных. На первом этапе проводится развертывание транспортных детекторов и видеокамер. Собранные данные включают в себя информацию о характеристике транспортного потока: интенсивность, плотность, скорость и другие параметры.

б) Анализ информации. В этой фазе используются современные методы анализа данных и искусственного интеллекта для определения перегруженных участков, прогнозирования часа пик и проблем на дорогах.

в) Управление дорожным движением. На данном этапе происходит разработка и внедрение системы управления светофорами и другими дорожными знаками с целью оптимизации потока транспорта. Координация дви-

жения на перекрестках и улицах способствует снижению пробок и повышению эффективности движения.

2. Обзор необходимых технических и инфраструктурных изменений для внедрения АСУДД:

а) Установка детекторов и видеокамер. Эти устройства будут обеспечивать постоянное обновление информации о характеристике транспортного потока. Система дорожного видеонаблюдения – это интегрированная платформа, предназначенная для оперативного мониторинга и управления дорожной ситуацией. Она осуществляет непрерывный контроль состояния дорожной инфраструктуры, собирает данные о дорожном движении и нештатных ситуациях, а также оперативно предупреждает диспетчеров о происшествиях. Функционал системы включает передовые технологии видеоаналитики, обеспечивающие автоматическую обработку видеоданных и выявление различных аномалий и ситуаций на дорогах [11].

б) Централизованная система управления. Разработка центральной системы, способной анализировать и обрабатывать данные с детекторов в реальном времени, а также принимать решения по координации движения.

в) Система связи. Создание надежной сети связи для передачи данных между детекторами, контроллерами и светофорами. Это обеспечит оперативность и эффективность системы.

⁴ Мочалин С.М., Танская М.А. Интеллектуальные системы управления светофорами // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ». 2021. С. 357–361.

⁵ Кортон С.В. [и др.] О концепции построения Умного региона на территории Свердловской области // Департамент информатизации и связи Свердловской области: официальный сайт.URL: <https://dis.midural.ru/article/show/id/1241> (дата обращения: 15.01. 2021).

⁶ Потоцкая Е. Д., Митюгин В. А. Обоснование и опыт популяризации городского пассажирского транспорта // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта. Сборник научных трудов. 2019. Том. Выпуск 3. С. 56–63.

⁷ Корнилов С. М. Системы мониторинга транспортных потоков // Молодежная наука в развитии регионов. 2020. Т. 1. С. 35–39.

⁸ Split Cycle and Offset Optimisation Technique <https://trlsoftware.com/products/traffic-control/scoot/> (дата обращения: 25.01.2024)

⁹ SWARCO <https://www.swarco.com/products/software/urban-traffic-management/utopia#> (дата обращения: 05.02.2024)

¹⁰ Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) <https://www.scats.nsw.gov.au/home> (дата обращения: 13.02.2024)

¹¹ Технологии безопасности дорожного движения. Режим доступа:<https://tbdd.ru/node/97> (дата обращения: 22.02.2024)

¹² Жеглов А. Н., Расцветова Е. А. К вопросу об актуальности внедрения автоматизированной системы управления дорожным движением // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. №. 1. С. 442–444.

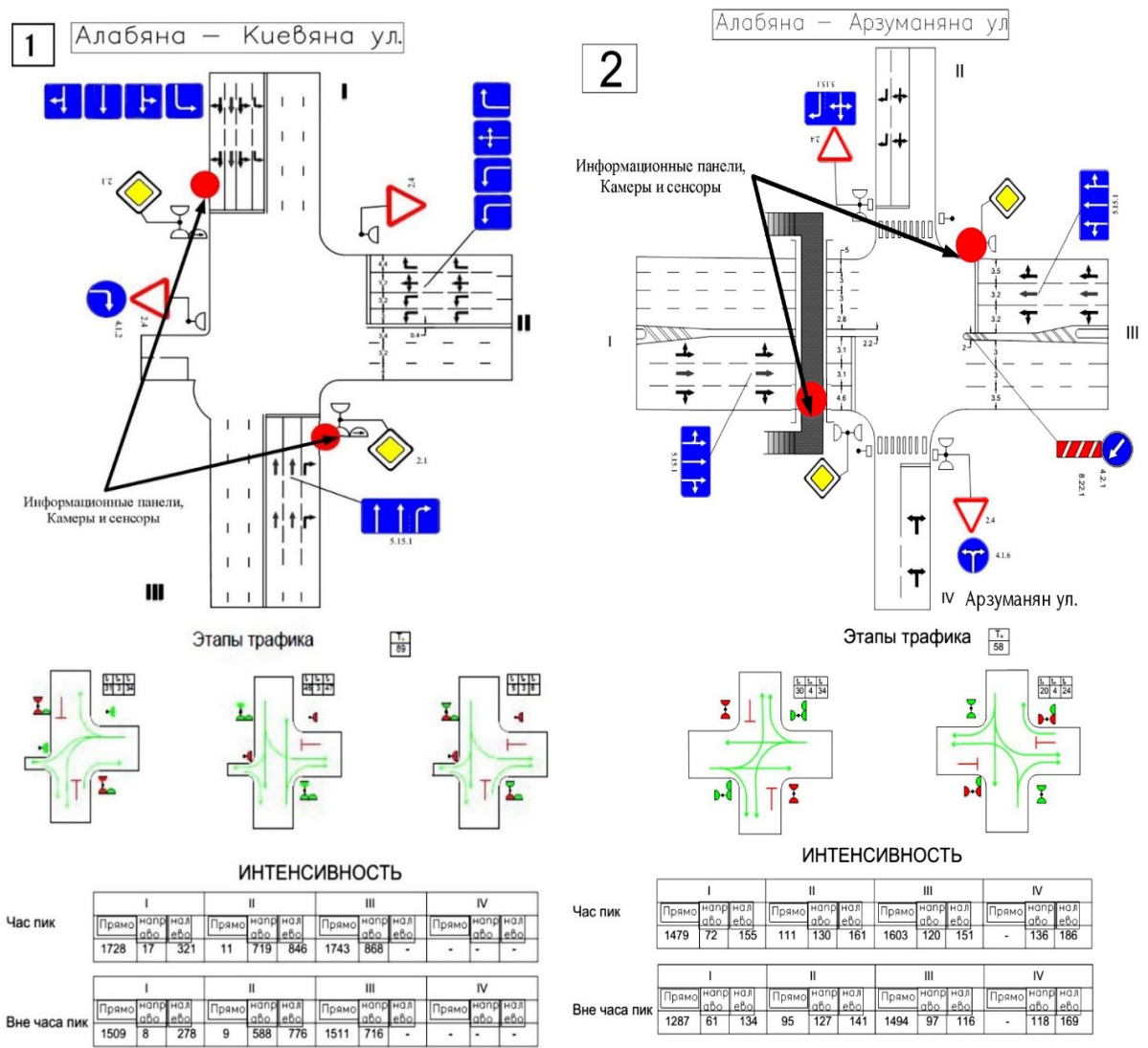


Рисунок 1 – АСУДД – анализ
Источник: составлено автором.

Figure 1 – ATMS analysis
Source: compiled by the authors.

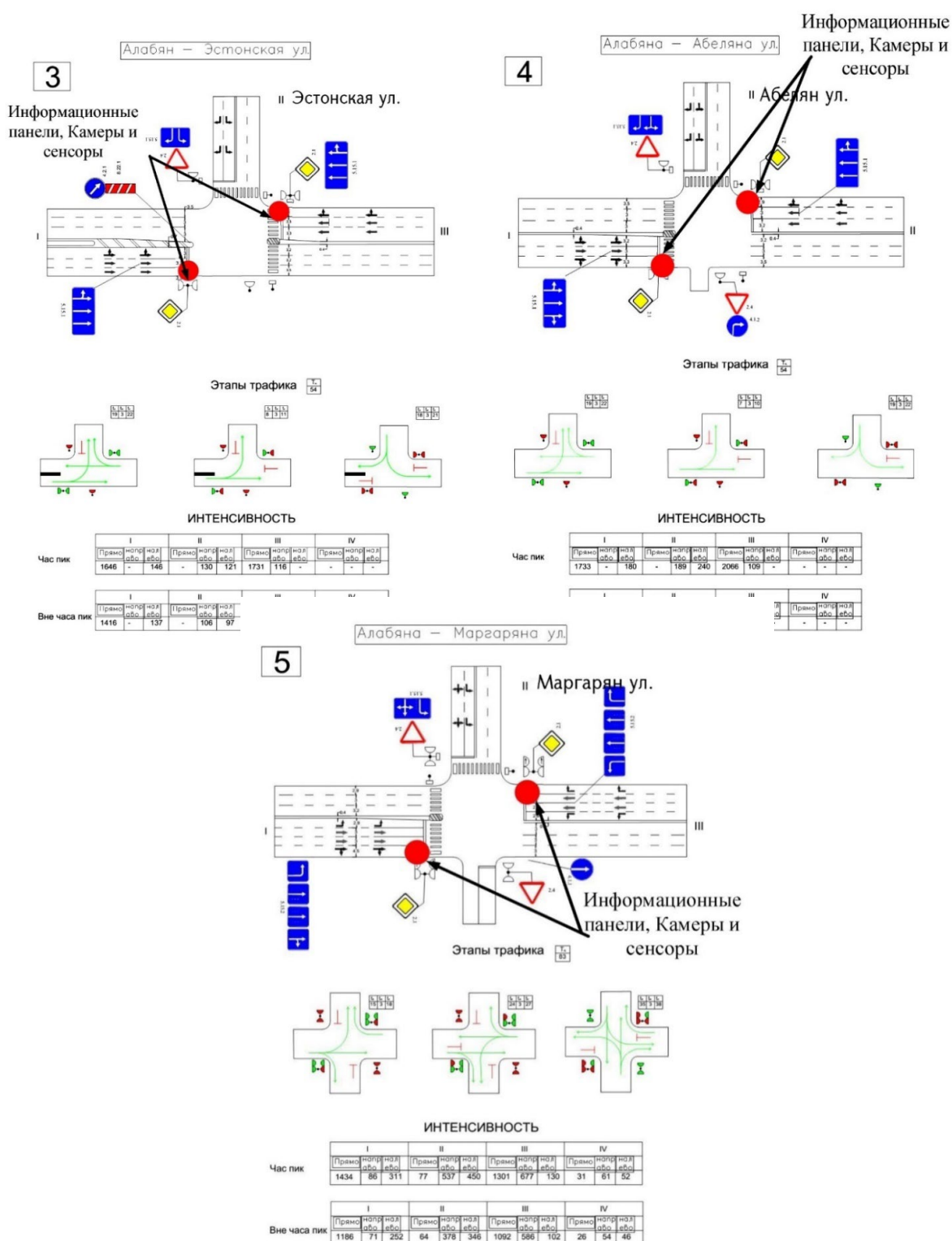


Рисунок 2 – АСУДД – анализ
Источник: составлено автором.

Figure 2 – ATMS analysis
Source: compiled by the authors.

3. Оценка затрат и ожидаемых выгод от внедрения системы:

а) Финансовая оценка. Оценка затрат на установку и настройку детекторов, создание программного обеспечения, обучение персонала и обновление инфраструктуры. Сравнение этих затрат с ожидаемыми выгодами.

б) Ожидаемые выгоды. Оценка планируемых результатов, таких как сокращение времени в пути, уменьшение пробок, снижение выбросов вредных веществ и улучшение безопасности. Количественная оценка экономических и социальных выгод для города и его жителей.

Внедрение автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) в Ереване предполагает комплексный подход, начиная от сбора данных и заканчивая реализацией централизованной системы управления. Оценка затрат и ожидаемых выгод играет большую роль в обосновании внедрения данной технологии и её положительного влияния на дорожную ситуацию в городе. В Ереване существует только жесткий режим светофорного регулирования, который не меняется в зависимости от колебаний интенсивности (рисунки 1, 2). Вышеизложенное является основанием для возникновения ряда негативных последствий (пробки, аварии, задержки и т.п.), поэтому, учитывая данное обстоятельство, вопрос внедрения АСУДД носит актуальный характер.

Улица Алабяна – одна из таких городских магистралей Еревана, расположенная в ад-

министративном районе Ачапняк. Начинается от Киевского моста и заканчивается на А. Иосифяна – Анастаса Микояна перекрестке. Улица имеет длину 2400 м, среднюю ширину 22,3 м и пересекается с улицами Ленинградяна, Арзуманяна, Эстонакана, Абеяна и Маргаряна. В связи с высокой интенсивностью «пикового» времени на улице Алабяна наблюдается перегруженное движение, из-за чего происходят задержки, пробки и аварии с учетом существующей организации движения, что не дает желаемого результата. Каждая транспортная развязка на улице Алабяна имеет от трех до четырех полос движения. Разница между последовательными перекрестками составляет 657 м [12].

Расчеты временного интервала T и пропускной способности P по формуле

$$P = \frac{3600(t_3 - t_{пер.})}{t_{и}} * T_{ц},$$

t_3 – продолжительность зеленого сигнала для данного направления;

$t_{пер.}$ – в момент включения зеленого сигнала – время пересечения линии «стоп» первым автомобилем (для расчетов принимается 2 сек);

$t_{и}$ – при пересечении линии «стоп» средний интервал между автомобилями (для расчетов принимается 2 сек);

$T_{ц}$ – продолжительность цикла.

Результаты приведены в таблице.

Таблица
Временной интервал T и пропускная способность P
Источник: составлено автором.

Table 1
Time interval T and Bandwidth P
Source: compiled by the authors.

	Не в часы пик	Часы пик	Не в часы пик	Часы пик
Перекресток	Пропускная способность	Пропускная способность	Временной интервал	Временной интервал
Алабян-Киевян	586	586	2.3	1.87
Алабян-Арзуманян	869	869	2.7	1.93
Алабян-Эстонский	933	933	2.27	1.58
Алабян-Абеяна	567	567	2.32	1.66
Алабян-Маргарян	477	477	2.43	1.7

P не меняется в обоих случаях, но время, очевидно, меняется. Этот промежуток времени очень велик, и он не принят, это говорит о необходимости новых автоматических способов. Рассмотрим пример расчета внедрения автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) на конкретной улице в городе Ереване.

Шаг 1: Сбор данных и анализ

Первый этап внедрения АСУДД – сбор данных о текущей ситуации на выбранной улице. В рамках данного этапа выбираются участки улично-дорожной сети города для выполнения оценки текущей транспортной ситуации, определение причин возникновения проблем, установление границ рассматриваемого участка дорожной сети¹³. Транспортный поток представляет собой организованное движение транспортных средств по транспортной сети. Для оценки и характеристики транспортных потоков используются следующие основные показатели [13]:

Интенсивность движения: количество транспортных средств, проходящих определенную точку или сегмент дороги за определенное время. Этот показатель позволяет оценить загруженность дорожной инфраструктуры.

Временной интервал: промежуток времени между двумя последовательными транспортными средствами. Он важен для анализа уровня плотности движения и безопасности на дороге.

Плотность движения: количество транспортных средств на определенном участке дороги в единицу времени и пространства. Этот показатель отражает степень наполненности дороги и помогает определить уровень конгестии.

Скорость: скорость движения транспортных средств по дороге. Высокие значения скорости могут свидетельствовать о хорошем протекании движения и эффективности дорожной инфраструктуры.

Пробки и задержки: определение частоты и продолжительности пробок.

Безопасность: анализ данных о дорожных авариях и их причинах на улице.

Шаг 2: Проектирование и установка инфраструктуры

На основе данных, собранных на первом этапе, определяются необходимые изменения в инфраструктуре улицы. Это может включать:

Установку видеокамер и детекторов: размещение камер для мониторинга движения и датчиков для измерения скорости, интенсивности и плотности транспортного потока (см. рисунки 1, 2).

Информационные панели: установка информационных панелей для предупреждения водителей о текущей ситуации и изменениях в движении.

Светофоры и знаки: необходимо определить, нужны ли изменения в сигнализации, например, синхронизация светофоров для оптимизации потока.

Анализ полученной статистики предыдущих этапов позволяет определить целесообразность внедрения автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД) на рассматриваемом участке улично-дорожной сети (УДС). Исходные данные о рассматриваемом пересечении включают интенсивность транспортного потока, продолжительность светофорных фаз, конфигурацию пересечения и правила дорожного движения.

Среднечасовая интенсивность транспортного потока определяется согласно ГОСТ 32965–2014 «Дороги автомобильные общего пользования» с использованием визуального метода. Преимущества этой метода является экономичность, мобильность, возможность получения данных без специального оборудования и навыков [14]. Однако его недостатками являются низкая точность и зависимость от субъективных обстоятельств. Кроме того, для получения исходных данных применяется метод натурного обследования транспортных потоков [15].

Шаг 3: Разработка программного обеспечения

На этом этапе разрабатывается программное обеспечение для АСУДД, которое будет обрабатывать данные и управлять дорожным движением. Программное обеспечение должно:

¹³ Жанказиев С.В., Воробьева А.И., Плетнев М.Г. Комплексные подходы к разработке проектов ИТС (АСУДД): метод. указания по подготовке курсовой работы. М.: МАДИ, 2021. 72 с.

Анализировать данные: обрабатывать информацию о текущей ситуации на улице на основе данных.

Принимать решения: на основе анализа данных программа должна принимать решения о смене режима работы светофоров, оповещении водителей о пробках и задержках.

Связь с устройствами: программное обеспечение должно быть способным взаимодействовать с контроллерами, светофорами, информационными панелями и другой инфраструктурой для внесения изменений в управление движением.

Шаг 4: Внедрение и тестирование

На этом этапе АСУДД внедряется на улице, и система проходит тестирование. Это включает:

Тестирование функциональности: проверка работы всех компонентов системы, включая детекторы, видеорекамеры и программное обеспечение.

АСУДД предполагает использование как проводных, так и беспроводных каналов связи, наличие собственного центра обработки данных, центра управления дорожным движением и наличие профильных специалистов в области организации дорожного движения. К ним относятся как операторы/диспетчеры центра управления, так и дорожные инженеры, чей талант и квалификации чрезвычайно важны для максимально эффективного функционирования АСУДД [16]

Моделирование сценариев: проведение моделирования различных сценариев движения и проверка, как система реагирует на них. Математическое моделирование транспортных потоков становится неотъемлемой частью разработки автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУД). Исследование динамики как отдельных транспортных средств, так и потоков в целом на различных уровнях – от микро до макро – с использованием разнообразных физических и математических моделей, обеспечивает прогнозирование общей ситуации на дорогах и разработку эффективных алгоритмов минимизации задержек на дорогах [17].

Шаг 5: Оценка результатов

После внедрения системы проводится оценка ее эффективности. Это включает:

Сравнение с предыдущим состоянием: сравнение данных о транспортном потоке, скорости и безопасности до и после внедрения АСУДД.

Оценка затрат и выгод: анализ экономических результатов внедрения системы, включая снижение затрат на топливо и уменьшение дорожных аварий.

Отзывы пользователей: сбор отзывов от водителей и пешеходов о качестве управления дорожным движением.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования показывают, что на перекрестках дороги возникают сложные ситуации, когда в одном направлении наблюдается высокая интенсивность транспортного потока, а в другом – низкая, что приводит к заторам и длительным задержкам транспортных средств, следующих в направлении светофора, запрещающих движение транспортных средств. Подобные случаи наблюдаются в определенное время суток и особенно ночью, когда длительность сигналов светофора не соответствует фактической интенсивности движения.

После внедрения системы будет проводиться оценка ситуации на перекрестках, контроль предотвращения заторов, что необходимо для контроля цикла работы светофоров и основного такта транспортного потока.

Преимущества внедрения АСУДД для оптимизации дорожного движения:

Внедрение АСУДД может принести множество положительных изменений в дорожную инфраструктуру Еревана:

1. Уменьшение пробок. Благодаря реальному времени, анализу и управлению потоком, АСУДД способна снижать нагрузку на наиболее загруженные участки дорог, уменьшая заторы и очереди.

2. Оптимизация времени в пути. Система позволяет оптимально распределить трафик, учитывая текущую ситуацию на дорогах и предоставляя водителям наиболее быстрый маршрут.

3. Снижение выбросов вредных веществ: плавное движение и снижение времени простоя автомобилей на перекрестках приводят к уменьшению выбросов и положительно влияют на экологию.

4. Улучшение управления транспортными потоками: АСУДД снабжены средствами сбора и анализа данных о движении, что позволяет оперативно реагировать на изменения ситуации на дороге и принимать меры по оптимизации транспортного потока.

5. Экологические выгоды: уменьшение времени простоя и оптимизация движения

способствуют снижению выбросов транспортных средств, что положительно сказывается на экологической обстановке в городе.

6. Улучшение безопасности: АСУДД способствует снижению вероятности аварийных ситуаций и дорожных конфликтов, так как система эффективно регулирует поток и обеспечивает более предсказуемое движение.

Различные исследования показывают, что внедрение АСУДД существенно сокращает задержки транспорта на перекрестках, снижая их на 10–20%. Это приводит к уменьшению расхода бензина на передвижение на 30%, что важно как с экономической, так и с экологической точки зрения. Кроме того, количество дорожно-транспортных происшествий на перекрестках сокращается на 10–15%, благодаря более эффективному регулированию потока и предотвращению аварийных ситуаций¹⁴. Интеллектуальные транспортные системы создают среду, способную повысить привлекательность городского общественного транспорта несколькими способами. Международные проекты демонстрируют, что сочетание качественной информации для пассажиров до и во время поездки с применением технологий спутниковой навигации обладает перспективным потенциалом [18].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ситуации дорожного движения в столице Армении, Ереване, явно указывает на наличие серьезных проблем, связанных с перегруженностью, пробками и неэффективным использованием дорожных ресурсов. В условиях быстро растущего автопарка и населения, важность решения этих проблем не может быть недооценена. Автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД) представляется перспективным решением для оптимизации дорожного движения в Ереване. Эта инновационная технология способна собирать, анализировать и управлять данными о трафике в режиме реального времени, позволяя снизить пробки, оптимизировать время в пути и улучшить экологическую обстановку.

Внедрение АСУДД требует не только технических и инфраструктурных изменений, но и финансовых вложений. Однако ожидаемые выгоды в виде снижения пробок, улучшения безопасности, экономии времени и ресурсов

для горожан и экологии города делают этот шаг вполне оправданным. Таким образом, внедрение АСУДД с учетом предложенных аспектов станет значимым шагом в улучшении дорожной ситуации в Ереване, обеспечивая жителям более комфортные условия передвижения и способствуя устойчивому развитию города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решетников Е.Б., Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова / Е.Б. Решетников, Л.С. Абрамова, Н.С. Чернобаев, В.В. Ширин // Вестник ХНАДУ. 2005. Вып. 29. С. 116–122.
2. Barcelo J. Modelling Advanced Transport Telematic Application with Microscopic Simulators / J. Barcelo, J. Casas, J. Ferrer, D. Garcia // Traffic and Mobility. Springer. 1999. Vol. 17. P. 205–221.
3. Vorobyev A.I. et al. Ensuring the Accuracy of Digital Road Model Data to Increase Situational Awareness // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). IEEE, 2021. P. 1–6.
4. Akabane A.T., Immich R., Bittencourt L. F., Madeira E. R.M., Villas L. A., Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system. Computer Communications. 2020. Vol. 151. pp. 306–319.
5. Sathiyaraj R., Bharathi A. An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multi-agent system. Transport, 2020, 35(3), 327–335.
6. Azatyan K., Igitkhanyan M., Ohanyan A. Challenges to Residential Quarter Reconstruction: The Case of the Center of Yerevan City // Journal of Architectural and Engineering Research. 2022. T. 3. P. 10–31.
7. Dimitrov P. Overview of the environmental and health effects of urban transport in the Russian Federation and the other countries in eastern Europe, the Caucasus and central Asia // Report presented on behalf of the WHO, UNECE, and PEP, at the Conference on Implementing Sustainable Urban Travel Policies in Russia and Other CIS Countries. 2004. T. 30.
8. Еланская М.В., Любичев Д.М., Дормидонтова Т.В. Автоматизированная система управления дорожным движением // Евразийский Союз Ученых. 2019. №4-3(61), Страница 22–25..
9. Кобзарь Е.В., Полетайкин А.Н., Шира Г.В. Концепция автоматизированной системы управления дорожным движением на участке улично-дорожной сети // Автомобильный транспорт. 2011. №. 28. С. 91–96.

¹⁴ Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2007. 104 с.

10. Баните А.В., Деряга Д.С., Леоненко О.В. Совершенствование городской транспортной системы путем внедрения адаптивных систем управления дорожным движением // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7, №. 4. С. 565–583.
11. Агуреев И.Е., Кретов А.Ю., Мацур И.Ю. Исследование алгоритмов светофорного регулирования перекрестка при различных параметрах транспортного потока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 54–61.
12. Саргсян А.Т., Хачатрян К.Г. Решение транспортных проблем города Еревана с внедрением современных технологий // Агронаука и технологии. 2023. № 3/83. С. 224–230.
13. Волкова Р.Ю., Загидуллин Р.Р. Автоматизированное управление дорожным движением по улице Мира (Дербышки) г. Казани // Техника и технология транспорта: научный Интернет-журнал. 2017. №1(2).
14. Якимов М.Р. Инновационные технологии сбора данных интенсивности движения транспортных и пассажирских потоков // Инновационный транспорт. 2016. № 2(20). С. 38–41.
15. Андронов Р.В., Гензе Д.А., Легостаева Е.Н., Белоусова Е.В. // Определение интенсивности транспортных потоков при помощи системы баллов карт пробок. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 5–12.
16. Самалькова А.С., Габдуллин Т.Р. Автоматизированные системы управления дорожным движением, как метод разгрузки транспортной сети // Техника и технология транспорта. 2019. № 1(10). С. 11.
17. Агуреев И.Е., Атлас Е.Е., Пастухова Н.С. Хаотическая динамика в математических моделях транспортных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 3. С. 372–389.
18. Новиков А.Н., Севостьянов А.Л., Катунин А.А., Кулев А.В. Применение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для повышения эффективности функционирования городского общественного транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2013. №. 1. С. 85–90.
4. Akabane A.T., Immich R., Bittencourt L. F., Madeira E. R.M., Villas L. A. Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system. *Computer Communications*. 2020; Vol. 151: 306–319.
5. Sathiyaraj R., Bharathi A. An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multi-agent system. *Transport*. 2020; 35(3): 327–335.
6. Azatyan K., Igitkhanyan M., Ohanyan A. Challenges to Residential Quarter Reconstruction: The Case of the Center of Yerevan City. *Journal of Architectural and Engineering Research*. 2022; T. 3: 10–31.
7. Dimitrov P. Overview of the environmental and health effects of urban transport in the Russian Federation and the other countries in eastern Europe, the Caucasus and central Asia. *Report pre-sented on behalf of the WHO, UNECE, and PEP, at the Conference on Implementing Sustainable Urban Travel Policies in Russia and Other CIS Countries*. 2004; T. 30.
8. Elanskaya, M.V., Lyubichev, D.M., Dormidontova T.V. Automated control system for road traffic. *Eurasian Union of Scientists*. 2019; 4-3(61): 22–25. (in Russ.)
9. Kobzar E.V., Polietaykin A.N., Shira G.V. Conception of automated road traffic control system on road network section. *Avtomobil'nyj transport*. 2011; 28: 91–96. (in Russ.)
10. Banite A.V., Deryaga D.S., Leonenko O.V. Improving the urban transport system by introducing adaptive traffic control systems. *Avtomatika na transporte*. 2021; T. 7. No. 4: 565–583. (in Russ.)
11. Agureev I.E., Kretov A.Yu., Matsur I.Yu. Investigation of algorithms for traffic light regulation of an intersection with different parameters of traffic flow. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2013; 7-2: 54–61. (in Russ.)
12. Sargsyan A.T., Khachatryan K.G., Solving transportation problems of Yerevan city with the introduction of modern technologies. *AgriScience and Technology*. 2023; 3/83: 224–230.
13. Volkova R.Yu., Zagidullin R.R. Automated traffic control on Mira (Derbyshki) street in Kazan. *Technique and technology of transport*. 2017; No. 1(2). (in Russ.)
14. Yakimov M.R. Innovative technologies for collecting data on traffic intensity of transport and passenger flows. *Innotrans*. 2016; No. 2 (20): 38–41. (in Russ.)
15. Andronov R.V., Genze D.A., Legostaeva E.N., Belousova E.V. Determination of the intensity of transport flows using a system of traffic jam map points. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2019; No. 4: 5–12. (in Russ.)
16. Samalykova A.S., Gabdullin T.R. Automated traffic control systems as a method of unloading the transport network. *Technique and technology of transport*. 2019; No. 1 (10): 11. (in Russ.)
17. Agureev I.E., Atlas E.E. Chaotic dynamics in mathematical models of transportation systems.

REFERENCES

Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU). 2012; 1: 94–106. (in Russ.)

18. Novikov A.N., Sevostianov A.L., Katunin A.A., Kulev A.V. Application of intelligent transport systems (ITS) to improve the efficiency of urban public transport. *World transport and technological machinery*. 2013; 1: 85–90. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Арман Тигранович Саргсян – соискатель Национального университета архитектуры и строительства Армении, мэрия Еревана, ответственный инженер проекта среднего и капитального

ремонта дорог (0009, Армения, Ереван, ул. Теряна, 105), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-1041-6804>, e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Arman T. Sargsyan – Applicant of the National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan Municipality, Responsible Engineer of Medium and Major Road Repair Project (0009, Armenia, Yerevan, 105 Teryan St.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-1041-6804>, e-mail: arman-sargsyan-97@mail.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья

УДК 624.21.01

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

EDN: TGHGZX



МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА С РАЗДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛА ПО НЕЙТРАЛЬНОЙ ОСИ

А.С. Белокопытов^{1,2} ✉, **В.А. Уткин¹**, **С.А. Матвеев¹**¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия²ООО ПРОЕКТНО-ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «МОСТОВИК»,
г. Омск, Россия✉ ответственный автор
a.sbel@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В сталежелезобетонных пролетных строениях прочность железобетона используется не полностью из-за двухстадийного включения в работу поперечного сечения и нерационального распределения материалов сечения. Чтобы повысить эффективность работы используемых материалов, предлагается объединять стальную и железобетонную часть по нейтральной оси поперечного сечения. При такой конструкции поперечного сечения сталь будет находиться всегда в растянутой зоне, а бетон в сжатой. Реализовать такую конструкцию возможно при сооружении пролетного строения в одну стадию из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления.

Материалы и методы. Реализовать методику расчета с разделением материала по нейтральной оси возможно при организации монтажа пролетного строения в одну стадию, приняв, что сечение пролетного строения работает в упругой стадии, и выполняя законы строительной механики. Чтобы охватить особенности расчета разрезных и неразрезных пролетных строений, принята консольно-балочная статическая схема.

Результаты. Представленные результаты аналитического расчета позволяют оценить расход материалов при изготовлении пролетного строения. Расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона – 6,54 м³/п.м.

Монтаж пролетного строения. Описан монтаж пролетного строения с учетом особенностей конструкции.

Выводы. Определена оптимальная статическая схема пролетного строения. Разработана методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси. Выполнен аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мост, сталежелезобетон, пролетное строение, нейтральная ось, методика расчета пролетного строения моста, плита проезжей части

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А. Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста с разделением материала по нейтральной оси // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 436-451. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

© Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>
EDN: TGHGZX

CALCULATION METHOD FOR A STEEL-REINFORCED CONCRETE BRIDGE SPAN STRUCTURE WITH MATERIAL SEPARATION ALONG THE NEUTRAL AXIS

Artem S. Belokopytov^{1,2} ✉, Vladimir A. Utkin¹, Sergei A. Matveev¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

²OOO MOSTOVIK Design and Engineering Company,
Omsk, Russia

✉ corresponding author
a.sbel@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In steel-reinforced concrete spans, the strength of reinforced concrete is not fully used due to the two-stage inclusion of the cross section in the work and the irrational distribution of materials in the section. To increase the efficiency of the materials used, it is proposed to combine the steel and reinforced concrete parts along the neutral axis of the cross section. With such a cross-section design, the steel will always be in the tension zone, and the concrete in the compression zone. It is possible to implement such a design by constructing a span in one stage from prefabricated steel-reinforced concrete blocks.

Materials and methods. It is possible to implement the calculation method with the separation of the material along the neutral axis when organizing the installation of the span structure in one stage, assuming that the section of the span structure operates in the elastic stage and following the laws of structural mechanics. To cover the features of the calculation of split and continuous span structures, a cantilever-beam static scheme was adopted.

Results. The presented results of analytical calculations make it possible to estimate the consumption of materials in the manufacture of the span. The steel consumption of the span under study is 6.12 t/m, the reinforced concrete consumption is 6.54 m³/m.

Installation of the span. The installation of the span is described, considering the design features.

Conclusions. The optimal static layout of the span structure has been determined. A method for calculating a steel-reinforced concrete span with material separation along the neutral axis has been developed. An analytical calculation was performed to select the geometric parameters of the cross sections of the span.

KEYWORDS: bridge, steel-reinforced concrete, superstructure, neutral axis, method for calculating the bridge superstructure, roadway slab

The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Belokopytov A.S., Utkin V.A., Matveev S.A. Calculation method for a steel-reinforced concrete bridge span structure with material separation along the neutral axis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 436-451. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

© Belokopytov A.S., Utkin V.A., Matveev S.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Сталежелезобетонные пролетные строения начали использовать в отечественном мостостроении с конца сороковых годов прошлого столетия преимущественно в автодорожных мостах.

Основная идея применения сталежелезобетонных конструкций – это выгодное использование работы бетона на сжатие, которое способствует экономии стали в главных балках пролетного строения. Такие пролетные строения мостов и путепроводов эффективно применять для перекрытия пролетов до 120 м.

Мосты со сталежелезобетонными пролетными строениями строят со сборной и монолитной плитой проезжей части. В отечественной практике строительства мостов до конца прошлого века активно использовались сборные плиты. Однако в настоящее время чаще применяется монолитная плита проезжей части. За рубежом сталежелезобетонные мосты строят преимущественно с монолитными плитами. Последние отечественные и зарубежные^{1,2,3} научные исследования сталежелезобетонных мостов приведены в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] и в [9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 20] соответственно.

Сборные железобетонные плиты, изготовленные на заводе, ускоряют и упрощают строительство. Однако конструкция объединения металла и железобетона не может обеспечить надежную и долгосрочную эксплуатацию пролетного строения. В связи с этим пролетные строения со сборными железобетонными плитами на сегодняшний день практически не применяются.

Преимущество монолитных плит по сравнению со сборными заключается в более надежном объединении их с металлическими балками для совместного восприятия усилий. Тем не менее для устройства монолитной железобетонной плиты требуется сооружение опалубки, арматурного каркаса с объединяющими элементами, укладка и уплотнение бетонной смеси, выдержка бетона до полного набора прочности в строительных условиях.

Из-за этого сроки и стоимость строительства мостов значительно возрастают.

В 1986 г. Сибирский автодорожный институт (СибАДИ) закончил обширную многолетнюю работу по обследованию и испытанию сталежелезобетонных мостов, построенных в период с 1957 по 1983 г. (руководитель работы – проф. К.Х. Толмачев, ответственный исполнитель – В.И. Пузиков, заказчик – Главдортех Минавтодора РСФСР). Обследовано 184 пролетных строения с целью определения их состояния и возможности перестройки мостов с габаритов Г-7 и Г-8 на Г-10 и Г-11,5 с целью оценки их состояния и возможности реконструкции для адаптации к современным требованиям.

Выводы по результатам обследований были однозначны: при таком состоянии сталежелезобетонных пролетных строений со сборными плитами реконструкция мостов с расширением проезжей части невозможна без принятия радикальных мер.

Основные выявленные дефекты:

1. Несовершенство конструкции объединения. Жесткие дискретные упоры создавали недопустимые напряжения в бетоне омоноличивания, вследствие чего он разрушался с одновременным отслаиванием плиты от верхнего пояса главных балок и образованием между ними зазоров до 20 мм по всей длине пролетного строения.

2. Некачественное выполнение работ при омоноличивании плит с балками и между собой в поперечных и продольных стыках, вследствие чего происходит выключение железобетонной плиты из совместной работы со стальной балкой.

3. Отсутствие надлежащей эксплуатации мостового сооружения. Выбоины в асфальтобетонном покрытии создавали сверхнормативные динамические нагрузки при пропуске по мосту большегрузных транспортных средств. Из-за нарушения гидроизоляции или плохого ее исполнения бетон плиты выщелачивается, в плите появляются трещины, из-за чего происходила коррозия арматуры. Физический износ наступал через 15 лет, хотя расчетный срок их службы намечался 60 лет.

¹ Iles D.C. Design Guide of Ladder Deck Bridges, SCI P339, The Steel Construction Institute, Ascot, United Kingdom, 2006.

² Hechler O., Berthelley J., Lorenc W., Seidl G., and Viefhues E., Continuous Shear Connectors in Bridge Construction // The 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI, July 2008, Tabernash, CO, American Society of Civil Engineers. 13 pp.

³ Steel – Concrete Bridges – Sustainable Design Guide / Daniel de MATTEIS (Setra), working group leader, 2010.

В связи со сложившейся ситуацией Н.Н. Бычковский в своих трудах⁴ поднимает перед отечественным мостостроением два вопроса: как быть со старыми сталежелезобетонными мостами, имеющими малые габариты проезжей части и находящимися в аварийном состоянии, и стоит ли дальше строить мосты со сталежелезобетонными пролетными строениями.

По первому вопросу, в практике реконструкции сталежелезобетонных мостов, пришли к решению замены железобетонной плиты на стальную ортотропную плиту проезжей части и тем самым продлить срок эксплуатации сооружения.

Второй вопрос необходимо рассматривать с точки зрения целесообразности строительства сталежелезобетонных пролетных строений со сборными и монолитными плитами и создания новых конструктивных форм сталежелезобетонных конструкций. Для этого требуется углубиться в характер работы конструкции.

Монтаж сталежелезобетонных пролетных строений без регулирования усилий происходит в две стадии. На первой стадии стальная главная балка воспринимает нагрузки от собственного веса, веса железобетонной плиты проезжей части и монтажных приспособлений. На второй стадии после набора прочности же-

лезобетонной плиты проезжей части в работу включается сталежелезобетонное сечение на восприятие нагрузок от веса мостового полотна и расчетных временных нагрузок.

Таким образом, прочность железобетонной плиты проезжей части в сталежелезобетонных пролетных строениях используется не полностью. А в неразрезных пролетных строениях в зонах растяжения плиты проезжей части железобетон не учитывается в совместной работе. Данный вопрос не раз рассматривался на научно-практических конференциях^{5,6,7,8}.

В публикации [21] предлагается расчёт прочностных характеристик разрезных пролетных строений с учетом объединения стальной и железобетонной части по нейтральной оси сечений пролетного строения. Данное решение основано на патенте⁹ и позволяет рациональнее использовать прочностные свойства материалов в составе сечения.

Изобретение¹⁰ представляет собой неразрезное пролетное строение. Особенностью приведенной конструкции является распределение материала по длине пролетного строения в соответствии с их прочностными свойствами. Железобетон располагается в сжатых зонах сечений, а сталь в растянутых. Таким образом, мы получаем пролетное строение с железобетонной плитой проезжей части и стальным нижним поясом в сечениях с поло-

⁴ Проблемы проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции транспортных сооружений и пути их решения: [в 3 ч.] / Н.Н. Бычковский; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратовский гос. технический ун-т. Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2008. 28 см.

⁵ Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А. Разработка и совершенствование сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 2–25 ноября 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 323–327. EDN VHUOSM.

⁶ Belokopytov A.S. The Substantiation of Steel-Reinforced Concrete Composite Bridge Superstructure Design / A.S. Belokopytov, V.A. Utkin, S.A. Matveev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019", Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 3, Chapter 2. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 032007. DOI 10.1088/1757-899X/753/3/032007. EDN UGNTVJ.

⁷ Уткин В.А., Матвеев С.А., Белокопытов А.С. Расчет разрезного сталежелезобетонного пролетного строения с учетом регулирования положения нейтральной оси // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Омск, 29–30 ноября 2018 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 269–273. EDN YVRXPN.

⁸ Уткин В.А., Матвеев С.А., Белокопытов А.С. Исследование сталежелезобетонных пролетных строений. Пути конструктивного и технологического совершенствования // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, Омск, 19–20 апреля 2018 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2018. С. 390–393. EDN XSYHUT.

⁹ Патент № 1823891 АЗ СССР, кл. E01D 7/02, 1988. Сталежелезобетонное пролетное строение: № 4917283/33 / Уткин В.А.; заявл. 07.03.1991; опубл. 23.06.1993.

¹⁰ Патент № 2040629 С1 Российская Федерация, МПК E01D 12/00, E01D 101/26, E01D 101/30. Сталежелезобетонное пролетное строение: № 5035073/33 / В. А. Уткин; заявл. 31.03.1992; опубл. 25.07.1995. EDN GVZHTH.

жительным изгибающим моментом и стальной ортотропной плитой и железобетонным нижним поясом в сечениях с отрицательным изгибающим моментом. Предложенное пролетное строение собирается на строительной площадке из готовых сталежелезобетонных блоков, изготовленных «в отпечаток» в заводских условиях. Монтаж производится в одну стадию.

Чтобы рационально использовать материалы в сечении, необходимо запроектировать такое пролетное строение моста, в котором стальная и железобетонная часть поперечного сечения сопрягаются по нейтральной оси. Пролетное строение состоит из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, которые сооружаются «в навес», что обеспечивает одновременное включение в работу всех материалов сечения.

Цель данной работы – разработать методику расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси, состоящего из сборных сталежелезобетонных блоков заводского изготовления. Монтаж пролетного строения производится в одну стадию.

При проектировании пролетных строений, объединение материалов по нейтральной оси сечения позволяет рационально использовать свойства стали и железобетона для повышения эффективности конструкции. Материал в сечении работает в соответствующем для него напряженном состоянии. Железобетон работает на сжатие. Сталь работает на растяжение.

Разделение материалов по нейтральной оси сечения и монтаж в одну стадию позволяют достичь следующих преимуществ:

- Экономия материалов: каждый материал используется в том напряженном состоянии, в котором он наиболее эффективен, что позволяет экономить материалы и уменьшить общую массу пролетного строения.

- Увеличение надежности: распределение напряжений между материалами позволяет увеличить прочность и надежность конструкции, так как каждый материал выполняет свою специфическую функцию.

- Эффективная работа материалов в сечении: одностадийный монтаж пролетного строения обеспечивает одновременное включение в работу стали и железобетона в сечении на восприятие всех возникающих усилий.

В статье поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальную статическую схему для расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста.

2. Разработать методику расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси.

3. Выполнить аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Положения расчета

Применения балочных сталежелезобетонных пролетных строений мостов экономически выгодно при длине перекрываемого пролета до 120 м. С такими пролетами применяют неразрезные, консольно-балочные и рамно-подвесные статические схемы пролетных строений.

Неразрезные пролетные строения относятся к категории статически неопределимых конструкций, что делает их особенно восприимчивыми к таким факторам, как неравномерная осадка опор к температурным воздействиям. Неразрезные статические схемы пролетных строений (рисунок 1, а) также обладают вытянутой зоной нулевых моментов.

Консольно-балочные и рамно-подвесные пролетные строения мостов являются статически определимыми. Они менее чувствительны к неравномерной осадке опор, что делает их более надежными в условиях эксплуатации. Особенности конструкции консольно-балочных и рамно-подвесных статических схем позволяют организовать монтаж укрупненными блоками пролетного строения. Рамно-подвесные системы (рисунок 1, б) являются частным случаем консольно-балочных пролетных строений. Они не имеют переходных зон на эпюре моментов, но недостатком данной конструкции является включение опор в работу пролетного строения.

Для учета особенностей неразрезных и разрезных систем больших пролетов мостов рассматривается консольно-балочная статическая схема (рисунок 1, в). Длина консолей в такой системе принимается согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе.

Конструкция пролетного строения моста предусматривает сопряжение стальной и железобетонной части по линии, проходящей через центры тяжести сталежелезобетонных сечений. Центр тяжести сечения, или нейтральная ось сечения, меняет свое положение по длине пролетного строения в зависимости от действующего изгибающего момента $M(x)$, образуя линию нейтральной оси.

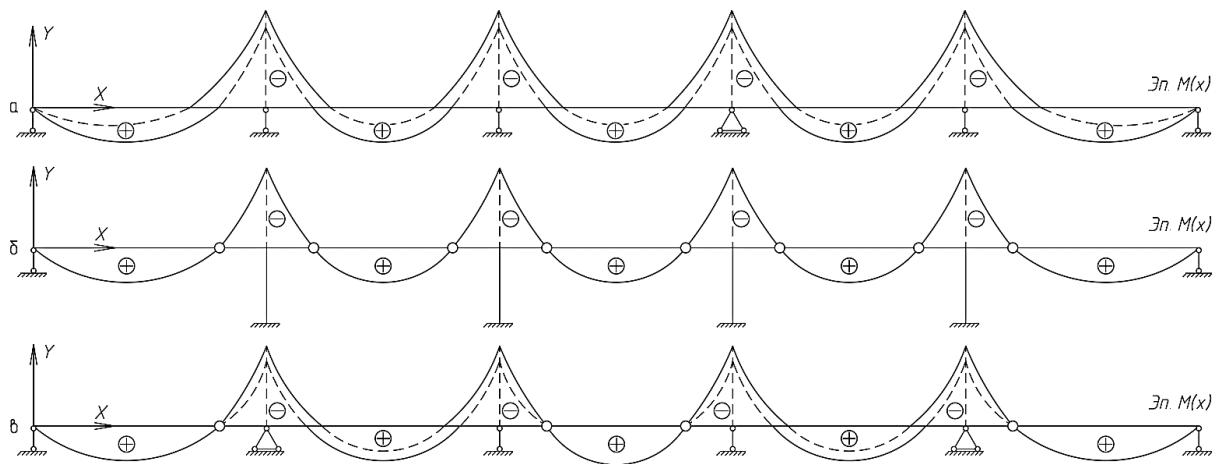


Рисунок 1 – Статические схемы пролетных строений:
 а – неразрезное пролетное строение;
 б – рамно-подвешенное пролетное строение;
 в – консольно-балочное пролетное строение
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Static diagrams of spans:
 а – continuous span structure;
 б – frame-suspended span structure;
 в – cantilever-beam span structure.
 Source: completed by authors.

Проектирование пролетного строения моста заключается в определении рациональных с точки зрения экономии материалов геометрических параметров поперечных сечений, таких как высота сечения и площадь элементов поперечного сечения.

Методика подбора геометрических параметров имеет следующие положения:

1. Сечения пролетного строения работают в упругой стадии и согласно гипотезе плоских сечений закон распределения напряжений прямолинейный. Таким образом, имеется возможность контролировать напряженное состояние конструкции в ее сечениях. Максимальное напряжение стальной части соответствует расчетному сопротивлению растяжения стали – R_{us} . Максимальное напряжение железобетонной части соответствует расчетному сопротивлению сжатия железобетона – R_{ub} .

2. Условие равновесия сечения при сумме усилий по $\Sigma X=0$ и при отсутствии продольных сил

$$\int_{F_b} \sigma_b dF = \int_{F_s} \sigma_s dF, \quad (1)$$

где σ_b – условие прочности бетонной части;
 σ_s – условие прочности стальной части;

Формула (1) может быть представлена как равенство нулю статических моментов инерции относительно нейтральной оси сечения

$$S_b = n_b S_s, \quad (2)$$

где S_b – статический момент инерции железобетонной части; S_s – статический момент инерции стальной части; $n_b = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения стали к бетону; E_s и E_b – модуль упругости стали и железобетона соответственно.

3. Условие прочности стального сечения

$$\sigma_s = M(x) \frac{y_s}{I_{st}}, \quad (3)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении; y_s – высота стальной части; I_{st} – момент инерции сталежелезобетонного сечения; σ_s – напряжение в крайней фибре стальной части, равное расчетному сопротивлению стали на растяжение.

Геометрические параметры определяются путем решения системы уравнений (4), составленной из формул (2) и (3):

$$\begin{cases} S_b = n_b S_s \\ \frac{y_s}{I_{st}} = \frac{M(x)}{R_{us}} \end{cases} \quad (4)$$

Методика расчета приводится для зон положительного и отрицательного изгибающего момента.

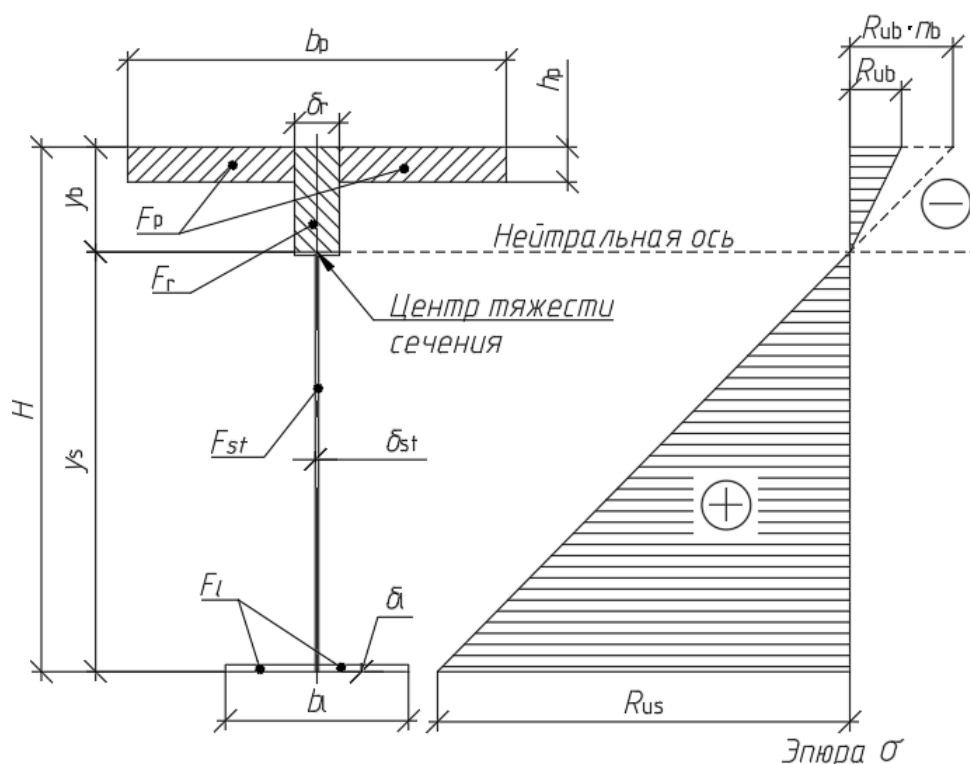


Рисунок 2 – Расчетная схема поперечного сечения в зоне положительного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Design diagram of the cross section in the zone of positive bending moment.
Source: completed by authors.

Методика расчета сечений в зоне положительного изгибающего момента

При действии положительного изгибающего момента в сжатой зоне поперечного сечения устраивается железобетонная плита проезжей части с переменной высотой ребра. В растянутой зоне поперечного сечения располагается двутавровая стальная главная балка с переменной высотой стенки. Сопряжение стальной и железобетонной части происходит по верхнему поясу стальной главной балки. Расчетная схема поперечного сечения приведена на рисунке 2.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты проезжей части; h_p – высота ж.б. плиты проезжей части; b_p – ширина ж.б. плиты проезжей части; F_r – площадь ж.б. ребра плиты проезжей части; δ_r – ширина ж.б. ребра плиты проезжей

части; F_{st} – площадь стальной стенки главной балки; δ_{st} – толщина стальной стенки главной балки; F_l – площадь стального нижнего пояса главной балки; δ_l – толщина стального пояса главной балки; b_1 – ширина стального нижнего пояса; y_b – высота железобетонной части сечения; y_s – высота стальной части сечения.

Из расчетной схемы очевидно, что соотношение высоты всего сечения H к стальной и железобетонной части может быть представлено следующим образом:

$$y_b = k \cdot H, \quad y_s = k_1 \cdot H, \quad (5)$$

$$\text{где } k = \frac{R_{ub} \cdot n_b}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}, \quad k_1 = 1 - k = \frac{R_{us}}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}.$$

После преобразования системы уравнения (4) получим

$$\begin{cases} \left[H(F_p k^2 + n_b F_l k_1^2) + \frac{H^2(\delta_r k^3 + n_b \delta_{st} k_1^3)}{3} + (k F_p h_p + k_1 F_l \delta_l) \right] \frac{1}{k_1 n_b} - \frac{M(x)}{R_{us}} = 0 \\ F_p \left(y_b - \frac{h_p}{2} \right) + F_r \frac{y_b}{2} - n_b F_{st} \frac{y_s}{2} - n_b F_l \left(y_s - \frac{\delta_l}{2} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

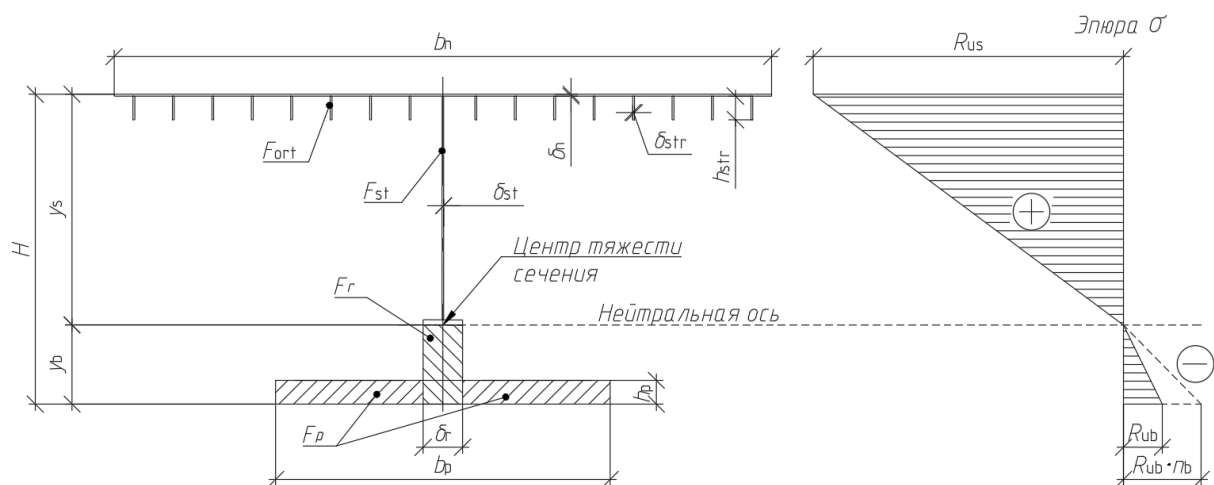


Рисунок 3 – Расчетная схема поперечного сечения в зоне отрицательного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Design diagram of the cross section in the zone of negative bending moment.
Source: completed by authors.

В зоне контакта стальной и железобетонной части располагается сопрягающий стальной лист. Сопрягающий лист стальной части находится близко к центру тяжести поперечного сечения, учет его в работе сечения дает поправку в результатах менее 1%, что дает возможность пренебречь им в расчете геометрических параметров сечения.

Решение системы уравнений (6) ведет к нахождению двух величин F_1 и H для сечения с максимальным изгибающим моментом. Высота пролетного строения в зоне положительных изгибающих моментов принимается постоянной, а положение нейтральной оси в каждом последующем сечении контролируется изменением нижнего пояса.

Методика расчета сечений в зоне отрицательного изгибающего момента

В зоне действия отрицательного изгибающего момента проезд осуществляется по стальной ортотропной плите проезжей части. Нижний пояс поперечного сечения железобетонный. Расчетная схема приведена на рисунке 3.

Подбор геометрических параметров ведется аналогичным способом, как и для сечений в зоне положительных изгибающих моментов. Так как стальная ортотропная плита имеет постоянные геометрические характеристики, то

в расчете определяющими параметрами будут площадь железобетонного нижнего пояса и высота всего поперечного сечения.

В ходе определения геометрических параметров для каждого i -го сечения подбирается соотношение стальной и железобетонной части в зависимости от изменения изгибающего момента. Таким образом, полная высота сечения H будет максимальная в зоне опирания пролетного строения и уменьшится по мере приближения к зоне изменения знака изгибающего момента до размеров сечения, полученного при расчете в зоне положительных изгибающих моментов.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты нижнего пояса; h_p – высота ж.б. плиты нижнего пояса; b_p – ширина ж.б. плиты нижнего пояса; F_r – площадь ж.б. ребра нижнего пояса; δ_r – ширина ж.б. ребра нижнего пояса; F_{st} – площадь стальной стенки главной балки; δ_{st} – толщина стальной стенки главной балки; F_{ort} – площадь стальной ортотропной плиты проезжей части; b_n – ширина стального настила; δ_n – толщина стального настила; h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты; δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты; y_b – высота железобетонной части сечения; y_s – высота стальной части сечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты аналитического расчета

К расчету принято консольно-балочное пролетное строение с длиной центрального пролета 109 м (рисунок 4). Консоли пролетного строения приняты равными 22 м согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе. Габарит проезда по расчетному пролетному строению Г-20, полная ширина пролетного строения 25,9 м. Поперечные сечения приведены на рисунке 5.

Ближайшим аналогом выбранной конструкции является Ленинградский мост через р. Иртыш в г. Омске, 1957 г. постройки, проект капитального ремонта выполнен в 2022 г.¹¹. Мост имеет сталежелезобетонные консоль-

но-балочное пролетное строение с центральным пролетом 109 м и консолью 11,5 м. Расход стали главных балок – 10,04 т/п.м., расход железобетона – 5,68 м³/п.м.

Класс расчетной временной нагрузки А14 и Н14, нагрузка от пешеходов на тротуарах принимается совместно с нагрузкой А14 и равна 3 кПа.

Одно из преимуществ данной конструкции и методики расчета – экономия материалов за счет их рационального распределения в сталежелезобетонном сечении. Поэтому геометрические и прочностные параметры элементов поперечного сечения принимаются минимальными в соответствии с требованиями нормативных документов¹² и конструктивной необходимости (таблица).

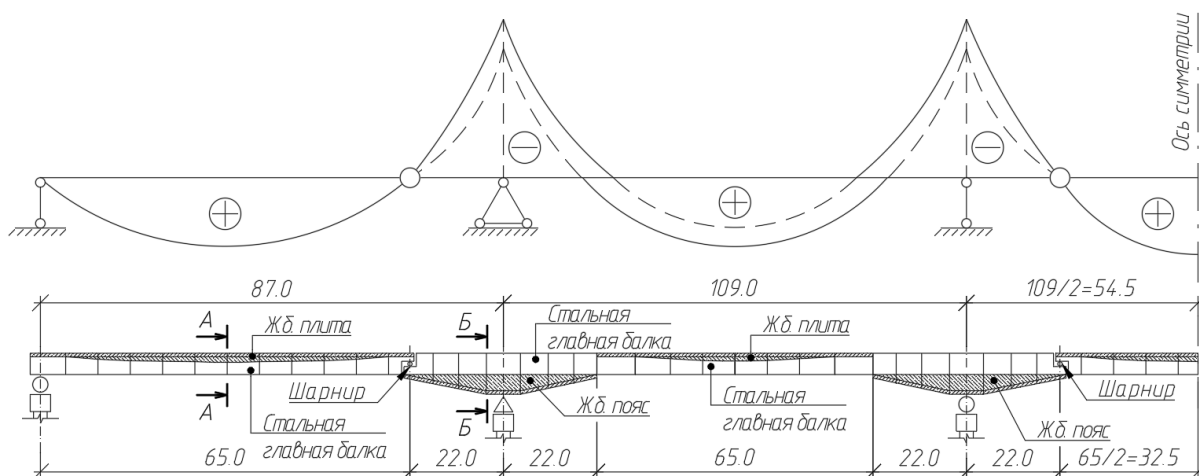


Рисунок 4 – Расчетная схема консольно-балочного пролетного строения
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Design diagram of a cantilever-beam span.
Source: completed by authors.

¹¹ Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А., Чучалина В.П. Ремонт мостов города Омска. Ленинградский мост // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 23–24 ноября 2023 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 411–416.

¹² СП 35.1330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84. М.: 2011. 287 с.

Таблица
Расчетные параметры элементов поперечного сечения
Источник: составлено авторами.

Table
Cross section element parameters
Source: completed by authors.

Параметр	Сечение	
	Зона положительных моментов (А-А)	Зона отрицательных моментов (Б-Б)
h_p – высота ж.б. плиты, мм	180	300
b_p – ширина ж.б. плиты, мм	3000	2310
δ_r – ширина ж.б. ребра, мм	300	300
δ_{st} – толщина стальной стенки балки, мм	12	12
h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	180	-
δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	14	-
δ_n – толщина стального настила, мм	14	-
b_n – ширина стального настила, мм	-	3000
b_n – расчетное сопротивление растяжению стали, МПа	295	295
R_{ub} – расчетное сопротивление сжатия железобетона, МПа	16,7	16,7
E_s – модуль упругости стали, МПа	206000	206000
E_b – модуль упругости железобетона, МПа	34500	34500

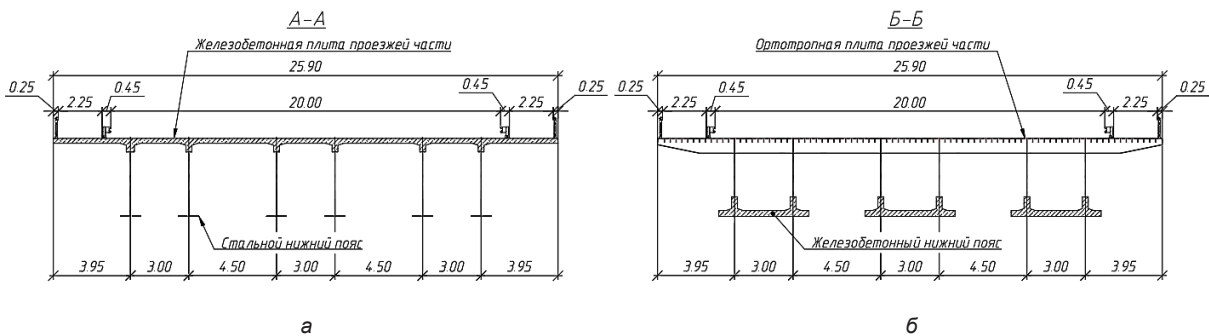
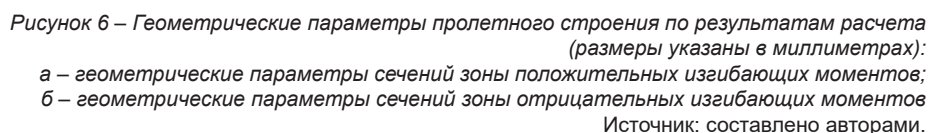


Рисунок 5 – Поперечное сечение проектируемого пролетного строения:
а – в зоне положительного изгибающего момента;
б – в зоне отрицательного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Cross section of the designed span:
а – in the zone of positive bending moment;
б – in the zone of negative bending moment.
Source: completed by authors.



a – geometric parameters of sections of the zone of positive bending moments;
b – geometric parameters of sections of the zone of negative bending moments.

Source: completed by authors.

Согласно результатам расчета получаем:

1. В зоне положительных изгибающих моментов устраивается железобетонная пли-

та проезжей части и стальной нижней пояса. Полная высота сечения составляет 3,924 м. Высота ребра железобетонной плиты при максимальном моменте составляет 1,048 м и уменьшается до 0,180 м к опорной зоне. Высота стальной стенки главной балки при максимальном моменте 2,876 м и увеличивается до 3,744 м к опорной зоне. Нижний пояс главной балки меняется от 0,850х0,040 м до 0,420х0,020 м к зоне опирания.

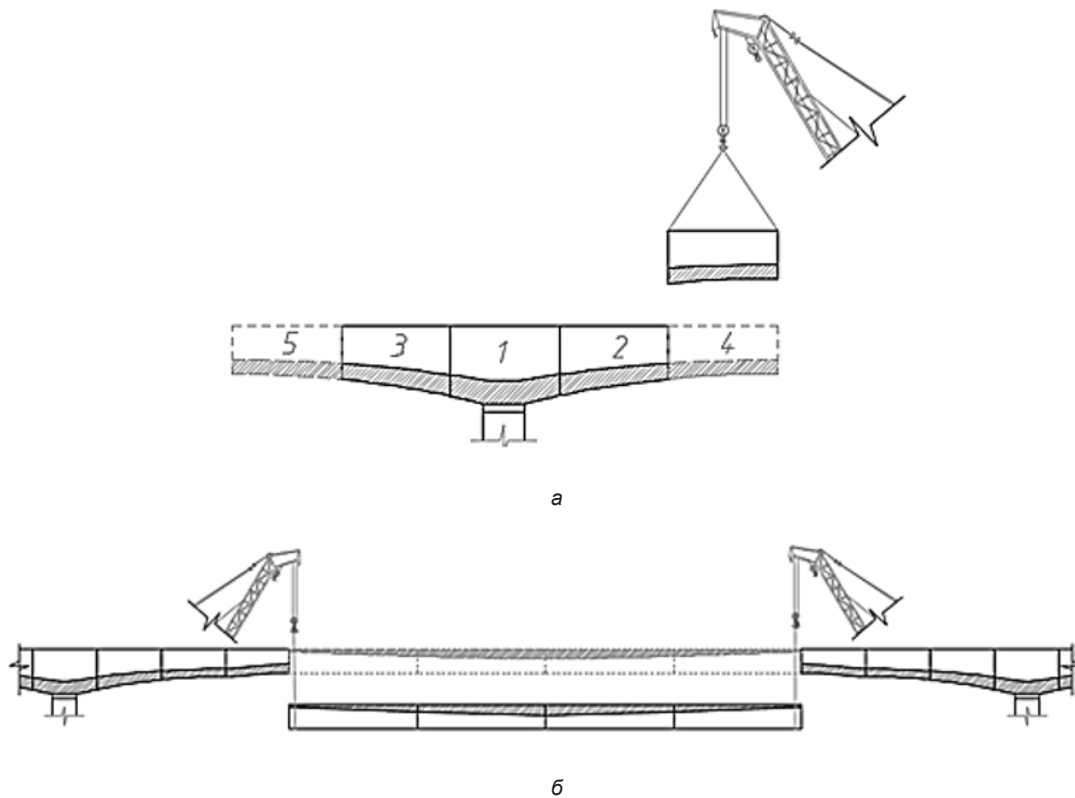


Рисунок 7 – Схемы монтажа пролетного строения:
а – монтаж консольной части;
б – монтаж подвесной части
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Schemes of installation of the span:
а – installation of the console part;
б – installation of the suspended part
Source: completed by authors.

2. В зоне отрицательных изгибающих моментов полная высота сечения переменная, проезд осуществляется по стальной ортотропной плите, а нижний пояс железобетонный. При максимальном моменте высота железобетонной части составляет 2,384 м, а стальной части – 3,842 м. В зонах нулевых моментов высота железобетонной части составляет 0,180 м, а стальной части – 3,744.

Расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона – 6,54 м³/п.м.

МОНТАЖ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ

Изготовление сталежелезобетонных блоков пролетного строения организовывается в непосредственной близости участка строительства, куда с завода металлоконструкций поставляется готовая стальная часть пролетного строения. Бетонирование железобетон-

ной части смежных блоков производится «в отпечаток», для обеспечения плотного обжатия железобетона после монтажа. На монтаже стык железобетонной части обрабатывается герметизирующим клеевым составом. Стык стальной части пролетного строения – фрикционный, на высокопрочных болтах и накладках.

Укрупненные блоки консольной части можно монтировать двумя способами: с применением временных опор, для обеспечения устойчивости конструкции, и с устройством временного анкера на опоре с очередным монтажом блоков с разных сторон (рисунок 7, а).

Укрупненная подвесная часть монтируется целиком в пролет с воды (рисунок 7, б). Монтаж подвесной части пролетного строения может производиться с плавсредства кранами либо с применением технологии Heavy Lifting.

Преимуществом приведенных методов монтажа пролетного строения является отсутствие высотных работ по устройству железобетонной части в пролете и сокращение общего срока производства работ. Также изготовление и монтаж не зависит от сезона производства работ.

Недостатком приведенного способа монтажа является необходимость устройства временного завода железобетонных изделий в непосредственной близости от площадки строительства и применение временных опор у консольной части пролетного строения либо усиление конструкции опоры. Но стоит отметить, что на временном заводе железобетонных изделий возможно организовать изготовление контурных блоков для опор моста, что уменьшит себестоимость опор.

ВЫВОДЫ

В данном исследовании решены следующие задачи:

1. Определена оптимальная статическая схема для расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста.

Консольно-балочная схема пролетного строения моста позволяет учесть особенности работы неразрезных и разрезных систем мостов больших пролетов.

2. Разработана методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси.

Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения позволяет проектировать как разрезные, так и неразрезные системы пролетных строений, состоящих из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления. Монтаж таких пролетных строений может осуществляться «целиком», после укрупнительной сборки, или «в навес», что обеспечивает одностадийное включение в совместную работу стальной и железобетонной части.

3. Выполнен аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

Возможность распределить материалы в сечении по их прочностным характеристикам (бетон – сжатие, сталь – растяжение) и контролировать уровень напряжений в каждом сечении пролетного строения позволяет уменьшить расход стали на изготовление пролетного строения.

По результатам аналитического расчета, расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона –

6,54 м³/п.м. В качестве сравнения расход стали главных балок Ленинградского моста через р. Иртыш в г. Омске – 10,04 т/п.м., расход железобетона – 5,68 м³/п.м., что на 39% больше и на 15% меньше исследуемого пролетного строения соответственно.

Перспективы развития работы лежат в детализации конструктивных решений исследуемого пролетного строения и оценки его напряженно-деформированного состояния с применением метода конечных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козак Н.В. Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролетного строения существующего автодорожного моста // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 1. DOI 10.15862/07SATS122. EDN CLALTW.
2. Козак Н.В. Комплексный анализ существующих методик проверки выносливости гибких штыревых упоров сталежелезобетонных автодорожных мостов по нормативам ряда стран // Транспортные сооружения. 2021. Т. 8, № 2. С. 10SATS221. URL: <https://t-s.today/10SATS221.html> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.15862/10SATS221 EDN: MRLPEF
3. Козлов А.В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки // Строительная механика и конструкции. 2018. № 4. С. 64–71. URL: item.asp?id=36545559 (дата обращения: 24.12.2021). EDN: YPUHVJ
4. Веселов В.В. Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 3. С. 633–644. DOI 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644. EDN HGPJAF.
5. Мирсаяпов И.Т., Валиев А.Т. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа железнодорожных мостов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 1(63). С. 31–42. DOI 10.52409/20731523_2023_1_31. EDN ECDUWC.
6. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. Т. 4, № 4. С. 205–208. EDN YROOWX.
7. Панова А.С., Сергеев Е.И. Особенности расчета сталежелезобетонных конструкций // Научный взгляд в будущее. 2019. Т. 1, № 14. С. 72–75. DOI 10.30888/2415-7538.2019-14-01-005. EDN CLPEEU.
8. Голованов В.А., Иванов Г.П. Анализ конструктивных решений малых мостов, выполненных из сталежелезобетона // Студенческий. 2019. № 25-1(69). С. 13–16. EDN SOIPXK.
9. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigating the corrosion initiation process in

reinforced concrete structures under the impact of climate change // *Architecture and Engineering*. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 37–44. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44. EDN SHOTRV.

10. Pavlov A., Khegay A., Khegay T. Analysis of bending steel fiber reinforced concrete elements with a stress-strain model // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5, No. 3. P. 14–21. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-3-14-21. EDN FMJAIK.

11. Johnson R.P. Resistance of stud shear connectors to fatigue // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. T 56. No. 2. pp. 101–116. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X99000826> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00082-6

12. Hassanin A.I., Shabaan H.F., Elsheikh A.I. The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020. T 45. No. 10. pp. 8403–8426. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1007/s13369-020-04702-4

13. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study // *Engineering Structures*. 2015. T 130. No. 15. pp. 298–307. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615005404> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035

14. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018. T 23. No. 8. P. 4018055. Режим доступа: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261

15. Xue W., Ding M., Wang H., Luo Z. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors // *Journal of Bridge Engineering*. 2008. T 13. No. 6. pp. 623–634. Режим доступа: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0702%282008%2913%3A6%28623%29> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13

16. Wang B., Huang Q., Liu X. Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors // *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2019. T 23. No. 1. pp. 217–227. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1007/s12205-018-1303-0

17. Steven L.S., Rajan S., Steel bridges with double composite action // *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 1696(1): pp.299–309, January 2000.

18. DU G., Pettersson, L., Karoumi, R., Steel soil composite bridge: an alternative design solution for short-span bridge towards sustainability // *Archives of institute of civil engineering*. 2017. Vol 23. pp. 45–52.

19. Subramanian N., Transportation Infrastructure Needs and Developments // *New Building Materials & Construction World (NBM & CW)*. 2011. Vol.17, No. 3. pp. 106–124.

20. Reese G.A. Innovative Applications of Precast Concrete to Complex Bridge Projects in Colorado // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2010. 2200(1). DOI: 10.3141/2200-18

21. Уткин В.А. Регулирование положения нейтральной оси при проектировании сечений стале-железобетонных пролетных строений // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2011. № 4(22). С. 39–42. EDN PBIJVF.

REFERENCES

1. Kozak N.V. Operating regime investigational study of steel-reinforced concrete superstructure flexible pin stops of the existing road bridge. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; Vol. 9, No. 1. (In Russ.) DOI 10.15862/07SATS122. EDN CLALTW.

2. Kozak N.V. Comprehensive analysis of existing endurance testing methods of flexible dowel crutches of composite reinforced concrete road bridges according to the standards of a number of countries. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; Vol. 8, No. 2: 10SATS221. (In Russ.) Available at: <https://t-s.today/10SATS221.html> (Accessed on: 24.12.2021). DOI: 10.15862/10SATS221. EDN: MRLPEF.

3. Kozlov A.V. Calculation of Steel-Reinforced Concrete Bridges Considering the Shear of the Plate Along the Upper Flange of the Beam. *Stroitel'naja mehanika i konstrukcii*. 2018; No. 4: 64–71. (In Russ.) Available at: item.asp?id=36545559 (accessed: 24.12.2021). EDN: YPUHVJ.

4. Veselov V.V. Application of Steel-Reinforced Concrete Structures in Bridge Constructions. *Journal «Proceedings of Petersburg Transport University»*. 2023; Vol. 20, No. 3: 633–644. (In Russ.) DOI 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644. EDN HGPJAF.

5. Mirsayapov I.T., Valiev A.T. Research on the Stress-Strain State of New Type Steel-Reinforced Concrete Beams for Railway Bridges. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 1(63): 31–42. (In Russ.) DOI 10.52409/20731523_2023_1_31. EDN ECDUWC.

6. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-Reinforced Concrete Constructions and Their Prospects for Use in Russian Construction Practice. *Uspehi sovremennoj nauki*. 2017; Vol. 4, No. 4: 205–208. (In Russ.) EDN YROOWX.

7. Panova A.S., Sergeev E.I. Features of Calculating Steel-Reinforced Concrete Structures. *Nauchnyj vzgljad v budushhee*. 2019; Vol. 1, No. 14: 72–75. DOI 10.30888/2415-7538.2019-14-01-005. (In Russ.) EDN CLPEEU.

8. Golovanov V.A., Ivanov G.P. Analysis of Structural Solutions for Small Bridges Made of Steel-Reinforced Concrete. *Studencheskij*. 2019; No. 25-1(69): 13–16. (In Russ.) EDN SOIPXK.

9. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigating the corrosion initiation process in reinforced concrete structures under the impact of climate change. *Architecture and Engineering*. 2021; Vol. 6, No. 2: 37–44. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44. EDN SHOTRV.

10. Pavlov A., Khegay A., Khegay T. Analysis of bending steel fiber reinforced concrete elements with a stress-strain model. *Architecture and Engineering*. 2020; Vol. 5, No. 3: 14–21. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-3-14-21. EDN FMJAIK.

11. Johnson R.P. Resistance of stud shear connectors to fatigue. *Journal of Constructional Steel Research*. 2000; T 56. no 2: 101–116. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X99000826> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00082-6

12. Hassanin A.I., Shabaan H.F., Elsheikh A.I. The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020; T 45. No 10: 8403-8426. Available at: <https://link.springer.com/article/> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1007/s13369-020-04702-4

13. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study. *Engineering Structures*. 2015; T 130. No 15: 298–307. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615005404> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035

14. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018; T 23. No 8: 4018055. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261

15. Xue W., Ding M., Wang H., Luo Z. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors. *Journal of Bridge Engineering*. 2008; T 13. No 6: 623–634. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0702%282008%2913%3A6%28623%29> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13

16. Wang B., Huang Q., Liu X. Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; T 23. No 1: 217–227. Available at: <https://link.springer.com/article/> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1007/s12205-018-1303-0

17. Steven L.S., Rajan S., Steel bridges with double composite action. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 1696(1): pp. 299–309, January 2000.

18. DU G., Pettersson L., Karoumi, R., Steel soil composite bridge: an alternative design solution for short-span bridge towards sustainability. *Archives of institute of civil engineering*. 2017; Vol 23:45–52.

19. Subramanian N., Transportation Infrastructure Needs and Developments. *New Building Materials &*

Construction World (NBM & CW). 2011; Vol.17, No.3: 106–124.

20. Reese G.A. Innovative Applications of Precast Concrete to Complex Bridge Projects in Colorado. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2010. 2200(1). DOI: 10.3141/2200-18

21. Utkin V.A. Regulation of the Neutral Axis Position in the Design of Steel-Concrete Composite Bridge Sections. *Vestnik SibADI*. 2011; No. 4(22): 39–42. EDN PBIJVF.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Белокопытов А.С. Провел исследование, провел анализ результатов и сформулировал выводы, подготовил публикацию (50%).

Уткин В.А. Автор идеи, сформулировал методику расчета, провел анализ результатов (25%).

Матвеев С.А. Проверил результаты расчетов, провел анализ результатов (25%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Belokopytov A.S. Research conducting, results analyzing and conclusions statement, publication preparation (50%).

Utkin V.A. The author of the idea, calculation method statement and results analyzing (25%).

Matveev S.A. Calculation results verification, results analyzing (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белокопытов Артем Сергеевич – аспирант, старший преподаватель кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), инженер-проектировщик ООО ПРОЕКТНО-ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «МОСТОВИК», **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-4790-1688>; **SPIN-код:** 1608-5965; e-mail: a.sbel@yandex.ru

Уткин Владимир Александрович – д-р техн. наук, доц. кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>, **SPIN-код:** 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru

Матвеев Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7362-0399>, **Scopus:** 56297305000; **Researcher ID (WoS):** Y-3137-2018; **SPIN-код:** 8304-1881; e-mail: dfsibadi@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem S. Belokopytov – Post-graduate student, senior lecturer of the Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University

(SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), design engineer, OOO MOSTOVIK DESIGN ENGINEERING COMPANY, **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0001-4790-1688> **SPIN-code**: 1608-5965; SibADI; e-mail: a.sbel@yandex.ru

Vladimir A. Utkin – Dr. of Sci., Associate Professor, Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>, **SPIN-code**: 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru

Sergey A. Matveev – Dr. of Sci., Professor, Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7362-0399>, **Scopus ID**: 56297305000; **Researcher ID (WoS)**: Y-3137-2018; **SPIN code**: 8304-1881; e-mail: dfsibadi@mail.ru

org/0000-0002-2044-3242, **SPIN-code**: 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru

Научная статья

УДК 624.075

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-452-463>

EDN: ICGWNL



ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ МЕЖДУ ПОЯСАМИ ЧЕТЫРЕХПОЯСНЫХ БАШЕН

Ю.В. Краснощеков¹ ✉, М.Ю. Заполева²¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия²ООО СМУ-175 «Радиострой»

г. Омск, Россия,

✉ ответственный автор

uv1942@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведены результаты исследования особенностей расчета четырёхпоясных башен в зависимости от направления ветровой нагрузки. Цель статьи – выявление условий перераспределения усилий в поясах решётчатой башни при действии ветровой нагрузки по диагонали квадратного сечения и потери устойчивости наиболее сжатого пояса. Обращено внимание на то, что при развитии процесса потери устойчивости сжатого пояса он не выключается полностью, а продолжает частично нести нагрузку. Полученные данные свидетельствуют о возможности расчета всех элементов и башни в целом по единой схеме А (давление ветра на грань башни) с учетом коэффициента угла воздействия ветра. В примере расчета получены графические зависимости усилий в поясах от отпорности.

Материалы и методы. Особенностью расчёта четырёхпоясных башен является зависимость усилий в поясах от направления ветровой нагрузки. По максимальным усилиям сжатия при действии ветра на ребро и изгибе башни принимаются сечение и длина панели всех поясов. Образующийся при этом резерв прочности и жесткости башни из двух поясов в предельном состоянии, принятом в нормах проектирования, реализовать не представляется возможным, так как предельное состояние сжатых поясов принимается по условию устойчивости в форме бифуркации. Если предельное состояние панелей поясов принимать по условию несущей способности в закритической стадии деформирования, то предоставляется возможность расчетного перераспределения сжимаемых усилий на резервные пояса. В приведенном примере для анализа перераспределения усилий между поясами при потере устойчивости наиболее сжатого пояса по расчетной схеме Б (давление ветра на ребро башни) используется критерий отпорности.

Выводы. Результаты моделирования расчета башни в ПК ЛИРА показали, что учет закритического деформирования сжатого пояса в упругой стадии допускает возможность выполнять расчет всех элементов и башни в целом по единой схеме А (давление ветра на грань башни) с учетом коэффициента угла воздействия ветра. При этом даже с увеличением значения коэффициента до 1,4 (вместо 1,2) эффективность расчета больше традиционного. Результаты исследования могут быть основанием для уменьшения расчетной длины элементов наиболее сжатого пояса по расчетной схеме Б.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальные конструкции, решётчатая четырехпоясная башня, сжатый пояс башни, устойчивость, расчётная длина ветви, отпорность, перераспределение усилий

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю. Перераспределение усилий между поясами четырёхпоясных башен // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 452-463. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-452-463>

© Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-452-463>
EDN: SLVGXA

REDISTRIBUTION OF EFFORTS BETWEEN THE BELTS OF FOUR-BELT TOWERS

Yury V. Krasnoshchyokov¹ ✉, Maria Y. Zapoleva²

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

²ООО SMU-175 Radiostroi
Omsk, Russia,

✉ corresponding author
uv1942@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of a study of the calculation features of four-belt towers depending on the direction of a wind action. The purpose of the article is to identify the conditions for the redistribution of forces in the belts of a grid tower under the action of a wind load along a diagonal of a square section and loss of stability of the most compressed belt. The attention is drawn to the fact that with the development of the process of loss of stability of the compressed belt, it does not turn off completely, but continues to partially carry the load. The data obtained indicate that it is possible to calculate all the elements and the tower as a whole according to a single scheme A (a wind pressure on the face of the tower), taking into account the coefficient of the wind angle. In the calculation example, graphical dependences of the forces in the belts on the resistance are obtained.

Materials and methods. A feature of the calculation of four-belt towers is the dependence of the forces in the belts on the direction of the wind load. According to the maximum compression forces under the action of wind on the rib and bending of the tower, the cross section and length of the panel of all belts are assumed. The resulting reserve of strength and rigidity of the tower of the two belts in the limiting state adopted in the design standards is not possible to implement, since the limiting state of the compressed belts is assumed by the condition of stability in the form of bifurcation. If the limiting state of the belt panels is assumed according to the condition of bearing capacity in the supercritical stage of deformation, then it is possible to calculate the redistribution of compressible forces to reserve belts. In the given example, the criterion of resistance is used to analyze the redistribution of forces between the belts when the stability of the most compressed belt is lost according to the design scheme B (wind pressure on the tower rib).

Conclusions. The results of modelling the tower calculation in the LIRA PC showed that taking into account the supercritical deformation of the compressed belt in the elastic stage makes it possible to calculate all the elements and the tower as a whole according to a single scheme A (a wind pressure on the face of the tower), taking into account the coefficient of the wind angle. At the same time, even with an increase in the coefficient value to 1.4 (instead of 1.2), the calculation efficiency is greater than the traditional one. The results of the study may be the basis for reducing the estimated length of the elements of the most compressed belt according to the calculated scheme B.

KEYWORDS: steel structures, grid four-belt tower, compressed tower belt, stability, estimated branch length, resistance, redistribution of efforts

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Krasnoshchyokov Y.V., Zapoleva M.Y. Redistribution of efforts between the belts of four-belt towers. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21(3): 452-463. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-452-463>

© Krasnoshchyokov Y.V., Zapoleva M.Y., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Решётчатые башни разных видов и назначений представляют собой пространственные системы из стержневых элементов: неразрезных поясов (ветвей) и решётчатых связей^{1,2} [1, 2, 3]. Наиболее распространены четырёхпоясные башни, особенностью расчёта которых является зависимость усилий в поясах от направления ветровой нагрузки. Наиболее опасные направления ветра W при расчёте решетки (А) и поясов (Б) показаны на рисунке 1.

В предварительных расчётах рекомендуется полностью передавать нормальные силы N и моменты M на пояса, а поперечные силы – на решетку, рассматривая башню как статически определимую систему. Наибольшие нормальные усилия в сжимаемом поясе башни при ширине граней b и давлении ветра по диагонали сечения допускается определять по формуле³

$$N_1 = - \frac{N}{4 \cos \gamma} \pm \frac{M_1}{b \sqrt{2} \cos \gamma}, \quad (1)$$

где γ – угол между поясом и вертикалью (на рисунке 1 $\gamma=0$).

При расчёте по схеме А нормальные усилия в сжатых поясах меньше, чем по схеме Б, и равны

$$N_{1,2} = - \frac{N}{4 \cos \gamma} \pm \frac{M}{2b \cos \gamma}. \quad (2)$$

Усилия, вычисленные по формуле (1), в 1,7 раз больше усилий, полученных по формуле (2). По максимальным усилиям принимаются поперечные сечения поясов, поэтому направление ветровой нагрузки на ребро считается неблагоприятным для работы поясов решётчатых башен.

Несущая способность сжатых поясов обычно характеризуется их устойчивостью, определяемой по наибольшему усилию (1) при $M_1 = k_1 M$. Согласно СП 20 коэффициент угла воздействия ветра $k_1 = 1,2$. По Еврокоду EN 1993-3-1 подобный коэффициент принимается в зависимости от угла воздействия к нормали грани в плане, коэффициента сплошности и при $\theta = 45^\circ$ (направление ветра по ди-

агонали конструкции квадратного сечения) может быть равным от 1 до 1,4.

На практике усилия в стержневых элементах решётчатых башен и горизонтальные перемещения верха сооружения, как правило, вычисляют по сертифицированным программным комплексам, реализующих метод конечных элементов [4, 5]. При расчёте на ЭВМ, в отличие от расчёта по приближенным формулам (1) и (2), учитывается упругое взаимодействие поясов с решеткой, поэтому усилия в поясах могут перераспределяться по мере уточнения компоновки статически неопределимой системы башни.

Например, программный комплекс ЛИРА, разработанный для применения в разных странах, предоставляет возможность проверки общей устойчивости с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости [5]. Реализованный вариант расчёта на общую устойчивость предполагает, что распределение продольных сил N в элементах уже известно (вычислены с помощью линейного процессора через критический параметр нагрузки), но ничего общего с расчётом по нормам РФ не имеет. Расчёт сводится к отысканию значения числового параметра λ по Эйлеру (коэффициент запаса общей устойчивости), соответствующего потери устойчивости при продольной силе λN .

Следует отметить, что программные комплексы регулярно совершенствуются с учётом изменений норм EN 1933-1-1. Европейскими нормами 1993-3-1 (проектирование стальных конструкций башен и мачт) допускается на начальном этапе рассчитывать решётчатые опоры без учёта сдвиговых деформаций за исключением башен с преобладающей нагрузкой вершины⁴.

В последнее время проведены многочисленные исследования влияния нагрузок и решетки на усилия в поясах башен при упругом деформировании элементов. На основании результатов численного исследования решётчатой башни призматической формы сделан вывод о тождественности статических расчётов для схем А и Б, а также о неопределённости влияния динамической компоненты ветровой нагрузки [6].

¹ Мельников Н.П. Антенные сооружения (Башни, мачты, радиотелескопы). М.: Знание, 1969. 48 с.

² Павловский В.Ф., Кондра М.П. Стальные башни (Проектирование и монтаж). Киев. Будівельник, 1979. 198 с.

³ Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения / под ред. В.В. Горева. М.: Высш. шк., 2002. С. 103.

⁴ Гарднер Л., Нетеркот Д. А. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3. М.: МГСУ, 2012. 224 с.

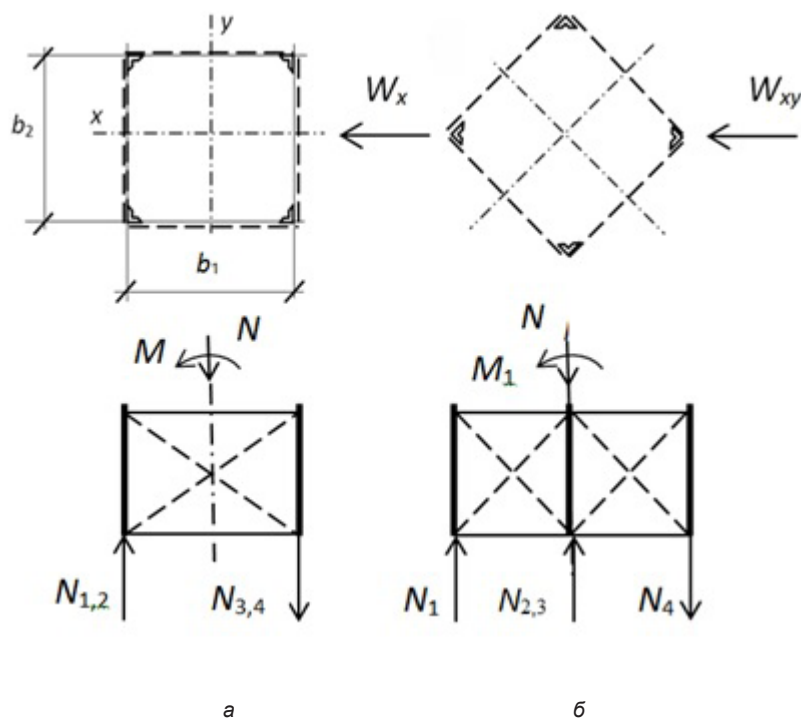


Рисунок 1 – Схемы наиболее опасных направлений ветра:
а – при расчёте решетки; б – при расчёте поясов
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagrams of the most dangerous wind directions:
a – when calculating the grid; b – when calculating the belts
Source: compiled by the authors.

При исследовании пирамидальной башни квадратного сечения с различной решеткой и жестком креплении раскосов к поясам, выполненным в ПК ЛИРА-САПР 2013, получено, что наибольшие усилия распределяются с поясов на элементы крестово-шпренгельной и крестовой решетки при действии ветровой нагрузки по схеме Б [7]. При аналогичном исследовании призменной башни наибольшие усилия в поясах также получены по схеме Б, но усилия в раскосах оказались для некоторых типов решетки больше по схеме А [8]. Таким образом, усилия в поясах, полученные методом конечных элементов, отличаются от определенных по формулам (1) и (2), так как учитывают взаимодействие поясов с решеткой.

Несущая способность элементов при действии сжимающих усилий (местная устойчивость) обычно проверяется вручную как при

центральной сжатии. Следует обратить внимание на то, что предельное состояние сооружения, определяемое по усилиям схемы Б, характеризуется устойчивостью одного сжатого элемента (N_1), а при расчете по схеме А пары сжатых поясов (N_1 и N_2)⁵. В то же время несущая способность двух поясов, расположенных по диагонали, перпендикулярной к направлению нагрузки W_{xy} по схеме Б, не используется, так как от действия момента $N_2 = N_3 = 0$.

Однако из рисунка 2 видно, что даже удаление одного элемента сжатого пояса в расчетной схеме Б практически не влияет на жесткость сооружения. Этот факт можно объяснить только перераспределением усилий с крайнего сжатого пояса на незагруженные до его отказа средние пояса без снижения нагрузки. Раскосы, показанные на рисунке 2, оказывают незначительное влияние.

⁵ Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен. Л.: Стройиздат. 1975. 186 с.

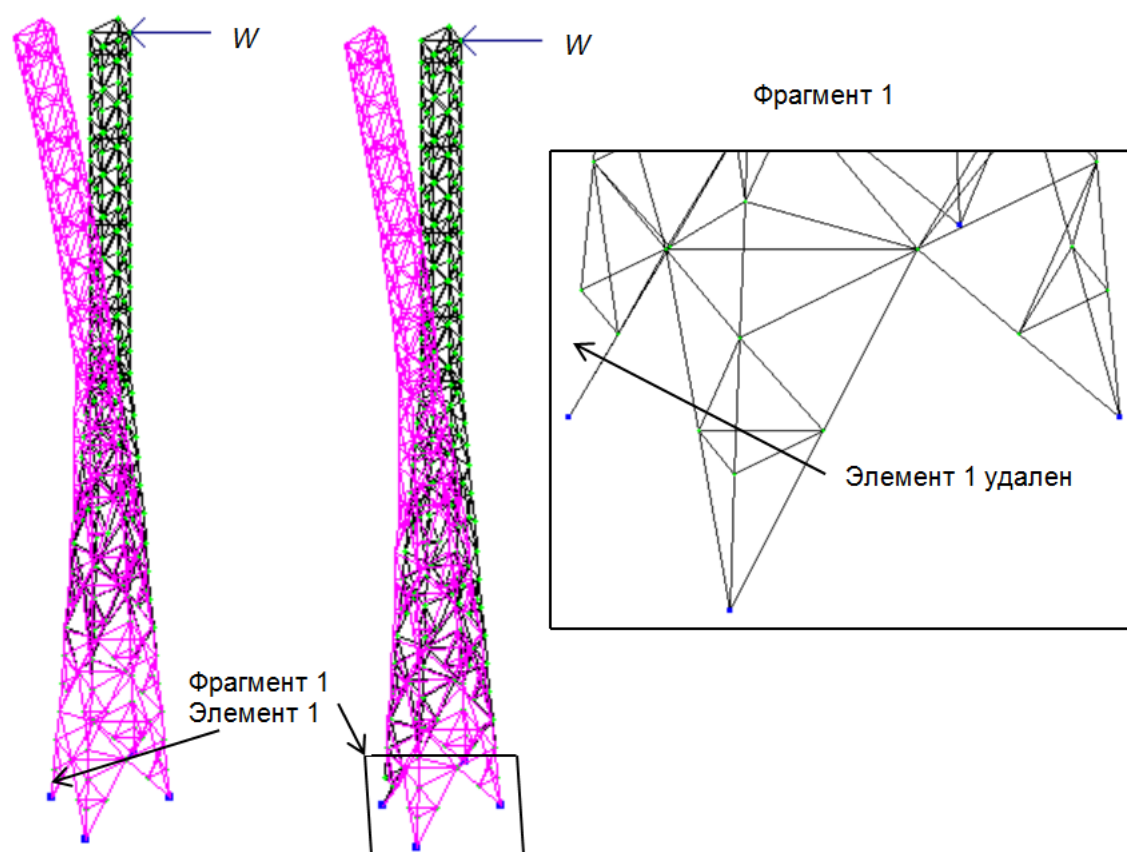


Рисунок 2 – Схемы четырехветвевой башни при отказе элемента сжатого пояса
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagrams of a four-branched tower in case of failure of a compressed belt element
Source: compiled by the authors.

Проблема перераспределения усилий в решетчатых башнях мало изучена. Исследования В.И. Трофимова показали, чем больше начальный прогиб элемента пояса, тем значительней снижается усилие на изогнутый пояс, т.е. более интенсивно происходит перераспределение нагрузки на прямые пояса⁶. Однако при прогибах до 1/400 перераспределение в экспериментах практически не наблюдается. Деформирование искривленных стержней под действием продольных сжимающих сил происходит за счет обжатия и изгиба. При малой величине искривления и жестких стержнях сближение концов за счет изгиба невелико. Для стержней гибкостью $\lambda = 60$, характерной для поясов башен, оно не более 2% даже с учетом краевой текучести. Волновое искривление всех панелей пояса, что возможно

при некачественной сварке, более опасно, чем местное искривление одной панели пояса, возникшее от ударных воздействий. При подобном характере искривления начальная стрелка в 1/450 может быть допущена как предельная, при этом несущая способность пояса снижается примерно на 3%.

Цель статьи – выявление условий перераспределения усилий в поясах решетчатой башни при действии ветровой нагрузки по диагонали квадратного сечения и потери устойчивости наиболее сжатого пояса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для расчёта опор башенного типа применяется модель пространственной системы, наряду с проверкой отдельных элементов которой, следует учитывать возможность до-

⁶ Трофимов В.И. Исследование устойчивости и несущей способности металлических конструкций типа опор линий электропередачи. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 320 с.

стижения предельного состояния системы в целом [9]. Система в целом рассматривается как сквозной стержень или стержень сквозного сечения. Считается, что несущая система башни характеризуется, прежде всего, общей устойчивостью сооружения и зависит от местной устойчивости сжатых элементов. Оба вида устойчивости относят к одной группе предельных состояний.

Условность раздельной проверки общей устойчивости стержня в целом и местной устойчивости отдельных ветвей отмечал В.В. Горев⁷ [10]. Он предлагал выполнять расчёт сквозных стержней по деформированной схеме с учётом взаимодействия общей и местной форм потери устойчивости по обобщённой зависимости, в которой критическое напряжение $\sigma_{cr} = \varphi_b \varphi R_y$ представлено как сопротивление стали с коэффициентом устойчивости ветви при расчётной длине, равной расстоянию между узлами соединительной решетки, и коэффициентом устойчивости сквозного стержня, определяемым в зависимости от условной приведенной гибкости стержня

$$\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef} \sqrt{\varphi_b R_y / E}. \quad (3)$$

Как видно из приведенных формул, во взаимодействии форм потери устойчивости В.В. Горев отдаёт предпочтение местной форме, принимая общую форму в непосредственной зависимости от местной.

Предложение В.В. Горева критически оценивает проф. Г.И. Белый, поскольку оно неоправданно занижает общую устойчивость решётчатого стержня [11]. Г.И. Белый приводит решение для проверки общей устойчивости по критическому напряжению $\sigma_{cr} = \varphi_{e,d} R_y$, которое включает дополнительную зависимость от коэффициента устойчивости ветви.

На основе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования развивается теория расчёта общей и местной устойчивости сжатых стержневых конструкций [12, 13, 14, 15, 16]. Автор нового подхода к расчёту устойчивости И.Д. Грудев определяет критическое состояние потери устойчивости по критерию достижения сжимающим усилием максимального значения в стержне с начальной

погибью⁸ [17]. Он утверждает, что можно отказаться от использования коэффициента продольного изгиба и от понятия расчётных длин сжатых стержней, вследствие чего расчёт становится менее трудоёмким и более точным. Что касается расчёта сквозных стержней, в качестве которых рассматриваются башни в целом, методика, изложенная в СП, по его мнению, неудовлетворительна не только по сложности и точности, но и в части представления процесса потери устойчивости.

Основанный на естественном критерии «нулевой отпорности» метод И.Д. Грудева связан с определением как докритического, так и закритического деформирования. По Грудеву несущая способность элемента конструкции определяется критическим состоянием, когда сжимающая сила достигает своего максимума, но другие параметры (прогибы, углы поворота, моменты) продолжают возрастать. Аргументом процесса деформирования принимается не сжимающее усилие, а монотонно возрастающий параметр сближения концов элемента. Состояние стержня с нулевой отпорностью является критическим и соответствует состоянию безразличного равновесия, когда перемещения увеличиваются без увеличения нагрузки. В закритической области деформации нарастают при падающей нагрузке и уменьшении продольного усилия, но остальные функции (деформации сжатия и изгиба) продолжают возрастать, что способствует перераспределению усилий в статически неопределённых конструкциях. При этом сохраняется действие гипотезы плоских сечений.

Критерий отпорности для исследования устойчивости использовали многие исследователи. Н.В. Корноухов рассматривал отпорность конструктивной системы как сопротивление росту деформаций при потере устойчивости второго рода, когда достигнув максимума, начинает уменьшаться с ростом деформаций. Такая потеря устойчивости связана либо с большими упругими деформациями, либо полностью за пределом упругости (задачи предельного равновесия)⁹.

Предельное состояние потери устойчивости по критерию отпорности развивает А.В. Геммерлинг¹⁰. Он определяет отпорность

⁷ Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1. Элементы конструкций / под ред. В.В. Горева. М.: Высш. шк., 2004. 551 с.

⁸ Грудев И.Д. Несущая способность сжатых элементов стержневых конструкций. М.: НИУ МГСУ, 2012. 387 с.

⁹ Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем. М.: Стройиздат, 1949. 376 с.

¹⁰ Геммерлинг А.В. Расчет стержневых систем. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.

как жесткость, характеризующую способность конструкции противодействовать приращению воздействия. А.В. Геммерлинг различает три случая применения расчетного критерия нулевой отпорности или три формы предельных состояний с отрицательной, нулевой и положительной отпорностью в запредельном состоянии. В частности, если отпорность в запредельной стадии нулевая, конструкция «течет» и обрушения не наступает. Все три формы неравнозначны в первую очередь по последствиям, поэтому они должны отличаться своей обеспеченностью. По мнению А.В. Геммерлинга, равновесное состояние стержня в закритической стадии возможно лишь в случаях, когда ему в момент достижения критического состояния будет оказана внешняя поддержка элементов статически неопределимой системы с достаточной отпорностью.

А.В. Перельмутер считает систему отпорной, если при любом ее деформировании изменение потенциальной энергии будет положительным [18]. Он допускает возможным практическое использование 1%-ого уровня отпорности конструкции диафрагм для определения её расчетной несущей способности.

Таким образом, существуют два метода оценки потери несущей способности стержневых конструкций при сжатии. В нормах проектирования используется классический метод потери устойчивости в форме бифуркации. В связи с развитием вычислительной техники и особенно с совершенствованием конечно-элементных расчетных моделей развивается метод, основанный на анализе изменяющегося поведения системы в зависимости от интенсивности загрузки, например, в форме кривой состояния равновесия (рисунок 3).

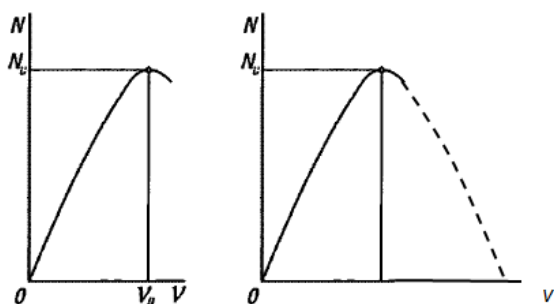


Рисунок 3 – Кривые состояния равновесия
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Equilibrium state curves
Source: compiled by the authors.

При расчете центрально сжатых стержней по нормам РФ зависимость усилий N и дефор-

маций v принимается по кривой состояния равновесия только в режиме увеличения параметров до предельных значений. Использование принципа отпорности предполагает наличие в кривой состояния равновесия ниспадающей ветви, способствующей перераспределению усилий между поясами. При расчете по схеме Б равновесное состояние стержня в запредельной стадии обеспечено, так как в момент достижения критического состояния ему оказывается внешняя поддержка элементов (средних поясов) статически неопределимой системы башни.

Для анализа перераспределения усилий между поясами при потере устойчивости наиболее сжатого пояса по расчетной схеме Б используется критерий отпорности. При этом доля или процент осевой жесткости пояса понимается как коэффициент отпорности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ МЕЖДУ ПОЯСАМИ

Объектом исследования является четырёхпоясная решетчатая башня. Конечно-элементная модель башни в ПК ЛИРА приведена на рисунке 1.

Экспериментальное исследование выполнено с целью выявления процесса перераспределения усилий между поясами четырехгранной башни при давлении ветровой нагрузки по диагонали сечения в результате потери устойчивости крайнего сжатого пояса. Расчет производился при упругом деформировании элементов.

Четырёхветвевая башня имеет высоту пирамидальной части $H_1 = 36$ м, призмной $H_2 = 28,8$ м, общая высота $H = 64,8$ м (см. рисунок 1). Квадратное сечение в плане образовано расстояниями между осями ветвей (поясов) в нижнем основании пирамиды $b_1 = 7,07$ м и в верхнем основании (оно же в сечении призмы) $b_2 = 2,4$ м. Ветви башни приняты: в опорной секции пирамиды из L160×12 ($J_{\min} = 376$ см⁴, $A_b = 37,4$ см², $i_{\min} = 3,17$ см), призмы – от L140×10 до L90×8. Высота панели (расстояние между узлами) ветви: пирамиды $l_{b1} = 2,41$ м, призмы $l_{b2} = 1,8$ м. Класс стали С 255 ($R_y = 240$ Н/мм², $E = 2,06 \cdot 10^5$ Н/мм²).

Максимальный изгибающий момент, действующий по диагонали башни, $M_1 = 6500$ кН·м. Максимальные расчётные значения усилия в сжатой ветви, полученные по ПК ЛИРА: без учёта момента $N = 50$ кН, с учётом момента $N_1 = 700$ кН, от момента $N_1 = 650$ кН.

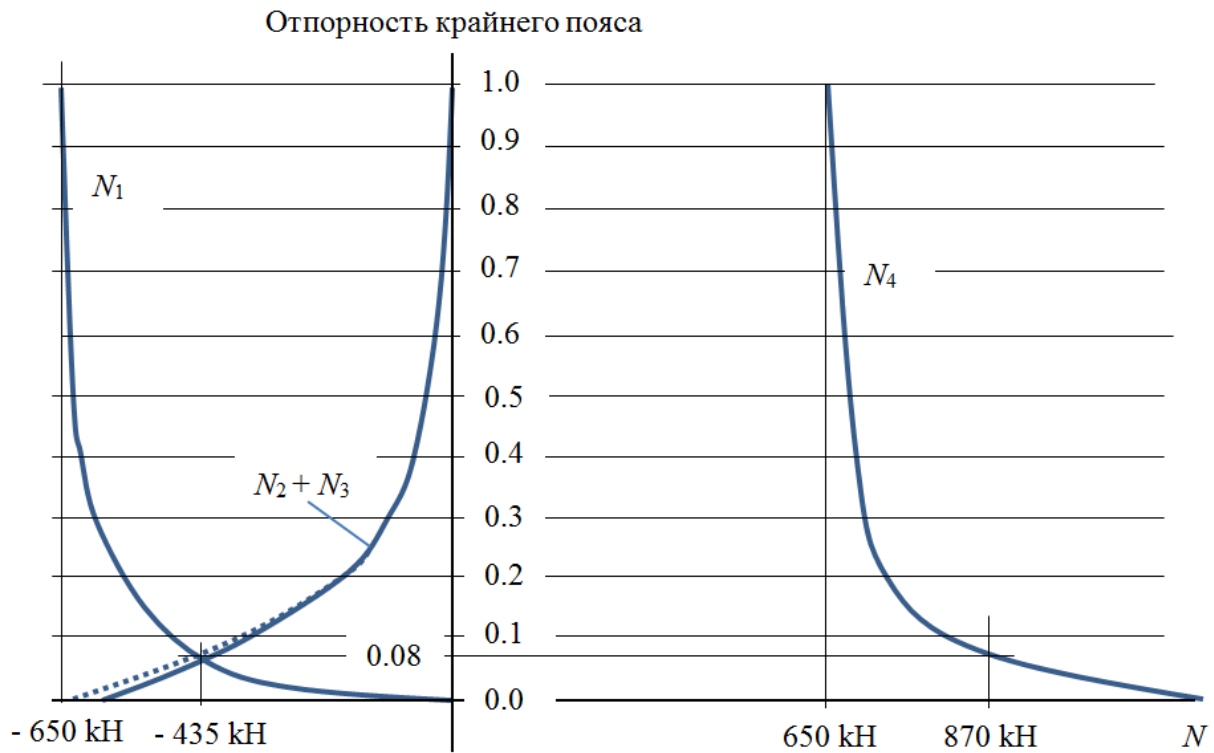


Рисунок 4 – Зависимости усилий в поясах от отпорности крайнего сжатого пояса
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the forces in the belts on the resistance of the extreme compressed belt
Source: compiled by the authors.

Расчёт на устойчивость элементов сплошного сечения выполняется по формуле

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

где φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяемый в зависимости от условной гибкости

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E}. \quad (5)$$

При расчетной длине $l_{ef} = l_{b1}$ гибкость ветви в пирамиде $\lambda = 241/3,17 = 76$. Приведенная гибкость $\bar{\lambda} = 76 \sqrt{240/206000} = 2,59 < 2,7$. Коэффициент устойчивости (тип сечения b по таблице 7 СП 16) $\varphi = 0,725$. Условие устойчивости (4) не выполняется, так как $700000/0,725 \cdot 3740 \cdot 240 \cdot 1 = 1,07 > 1$.

Основная предпосылка исследования: при потере устойчивости элемента наиболее сжа-

той ветви деформации оси элемента увеличиваются, но сопротивление не прекращается с соблюдением равновесия $N = EA$ на каждом этапе измерения усилий. Сопротивление (усилие N_1 панели нижнего яруса башни) характеризуется отпорностью, которая в данном случае выражается в долях от осевой жесткости сжимаемого крайнего пояса EA . Последовательно при каждом значении отпорности от 1 до 0 фиксируются усилия во всех ветвях нижнего яруса башни. При отпорности, равной 0, получены усилия с удаленной панелью (см. рисунок 2). Измерялись усилия не только в элементах поясов, но и раскосов.

По мере снижения отпорности зафиксированы неравномерные уменьшения усилий N_1 в крайнем сжатом стержне и увеличения сжимаемых усилий в средних стержнях N_2 и N_3 , а также растягивающего усилия N_4 . Происходит перераспределение усилий между поясами практически без изменения общего изгибающего момента на башне.

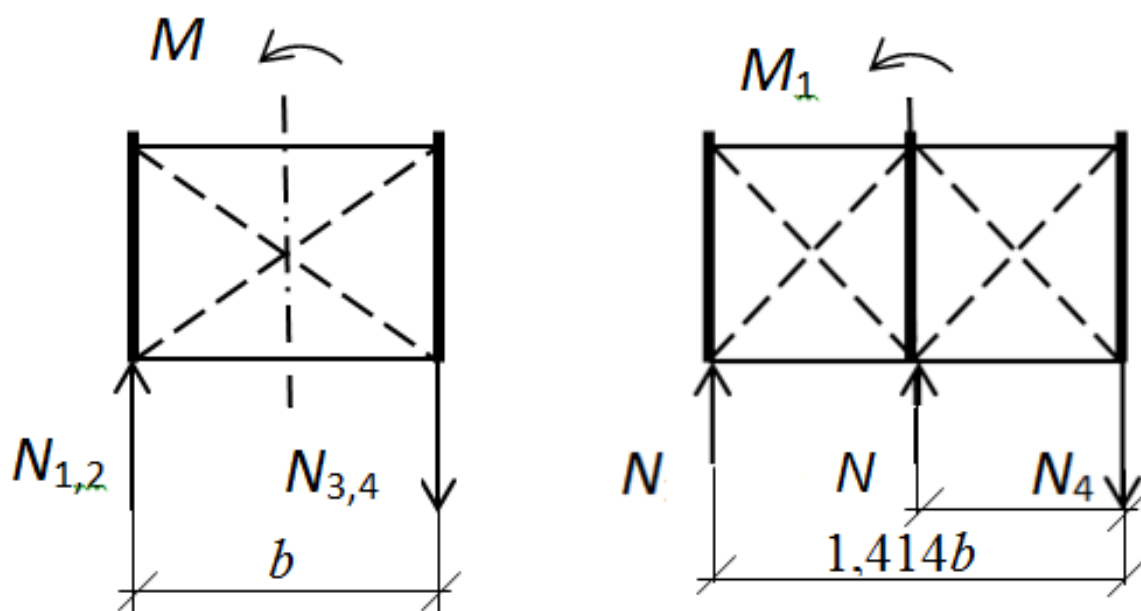


Рисунок 5 – К сравнению расчетных схем А и Б
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of calculation schemes A and B
Source: compiled by the authors.

При исследовании башня загружалась единичной силой, как показано на рисунке 2. График изменения усилий приведен на рисунке 4; значения усилий, приведенные на графике, соответствуют действию общего изгибающего момента без учета вертикальной нагрузки. Влияние раскосов ощутимо проявляется только на суммарное усилие $N_2 + N_3$ при отпорности менее 0,1 (точечная линия на графике). Получено равенство усилий $N_1 \approx N_2 + N_3$ при отпорности около 0,8.

Кривые, приведенные на рисунке 4, характерны для поясов любой четырехпоясной решетчатой башни, загруженной по схеме Б. По результатам рассмотренного примера проверяли следующие условия:

1. Момент усилий сжатых поясов относительно оси растянутого пояса равен моменту от внешних сил, действующих выше рассматриваемого сечения башни. В опорном сечении расстояние между крайними поясами по диагонали $1,414b = 10$ м. При отпорности, равной 1, расчетный момент $M_1 = 6500$ кН·м. При отпорности 0,08 и $N = N_1 = N_2 + N_3$, получим

$$N \cdot 1,414b + N \cdot 0,707b/2 = M_1. \quad (6)$$

Отсюда $N = 6500/15 = 435$ кН.

2. Сумма усилий сжатых поясов равна усилию растянутого пояса $2N = N_4$. Получено $2 \cdot 435 = 870$ кН.

3. Прочность растянутого пояса без учета усилий от вертикальной нагрузки $R_y A = 240 \cdot 3740 \cdot 10^{-2} = 898$ кН > 870 кН.

При нулевой отпорности усилие в растянутом поясе увеличивается до 1300 кН, $N_1 = 0$ и $N_2 + N_3 = 650$ кН.

Исходя из условности полученных данных, примем значение усилия в крайнем сжатом поясе с учетом влияния равномерно распределенной по всем поясам вертикальной нагрузки $N = 870 + 50 = 920$ кН как условно критическое в традиционной форме бифуркации и равное усилию в растянутом поясе. Увеличение критического усилия по сравнению с заданным $N_1 = 700$ кН возможно при уменьшении расчетной длины стержневого элемента. Для рассматриваемого примера коэффициент свободной (расчетной) длины $\mu = (700/920)^{1/2} = 0,87$. При отпорности менее 0,08 коэффициент расчетной длины может быть еще меньше. Если $I_{ef} = 0,87I_{b1}$ гибкость ветви в пирамиде $\lambda = 0,87 \cdot 241/3,17 = 66,1$; $\bar{\lambda} = 66,1 \sqrt{240/206000} = 2,26$; $\varphi = 0,784$. Условие устойчивости сжатого стержня выполняется $700000/0,784 \cdot 3740 \cdot 240 \cdot 1 = 0,99 < 1$.

Сопоставим усилия, полученные по схеме Б, с усилиями по схеме А (рисунок 5). В рассматриваемом примере получено: изгибающий момент и сжимающее усилие по схеме Б: $M_1 = 6500 \text{ кН}\cdot\text{м}$, по (6) $N = 435 \text{ кН}$; по схеме А: $M = 6500/1,2 = 5417 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и $N = 5417/2 \cdot 7,07 = 383 \text{ кН}$. Если по схеме А принять $M = M_1$, то $N = 6500/2 \cdot 7,07 = 460 \text{ кН} > 435 \text{ кН}$. Это означает, что при принятых условиях схема А более опасна.

Полученные результаты основаны на упругих деформациях элементов. Расчёты на общую и местную устойчивость взаимосвязаны. Условием устойчивости (4) проверяется несущая способность башни в целом и элементов нижнего пояса ветви. Учитывая малую вероятность одновременного совпадения начальных несовершенств для всего стержня и отдельной панели ветви, а также наличие резервов несущей способности поясов, при расчете по схеме Б возможно снижение коэффициента расчётной длины μ_b между узлами наиболее сжатой ветви.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью расчёта четырёхпоясных башен является зависимость усилий в поясах от направления ветровой нагрузки. По максимальным усилиям сжатия при действии ветра на ребро и изгибе башни принимаются сечение и длина панели всех поясов. Образующийся при этом резерв прочности и жесткости башни из двух поясов в предельном состоянии, принятом в нормах проектирования, реализовать не представляется возможным, так как предельное состояние сжатых поясов принимается по условию устойчивости в форме бифуркации.

Если предельное состояние панелей поясов принимать по условию несущей способности в закритической стадии деформирования, то предоставляется возможность расчетного перераспределения сжимаемых усилий на резервные пояса. В приведенном примере для анализа перераспределения усилий между поясами при потере устойчивости наиболее сжатого пояса по расчетной схеме Б (давление ветра на ребро башни) используется критерий отпорности. При этом доля или процент осевой жесткости пояса понимается как коэффициент отпорности.

Результаты моделирования расчета башни в ПК ЛИРА показали, что учет закритического деформирования сжатого пояса в упругой стадии допускает возможность выполнять расчет всех элементов и башни в целом по единой

схеме А (давление ветра на грань башни) с учетом коэффициента угла воздействия ветра. При этом даже с увеличением значения коэффициента до 1,4 (вместо 1,2) эффективность расчета больше традиционного.

Результаты исследования могут быть основанием для уменьшения расчетной длины элементов наиболее сжатого пояса по расчетной схеме Б.

Следует отметить, что при описанном перераспределении увеличивается усилие в растянутом поясе, что влечет необходимость проверки его прочности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Краснощеков Ю.В. Эффективность антенных опор, возводимых на ограниченной площади // Вестник СибАДИ. 2012. № 5(27). С. 80–85.
2. Голиков А.В., Михальчонок Е.А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2019. Т. 20, № 2. С. 163–173.
3. Галай В.С. Устойчивость стальных центрально сжатых стержней в методиках СП 16.13330.2011 и EN 1993-1-1 // Alfabuild. 2019. С. 82–91.
4. Зиганшин А.Д., Ахтямова Л.Ш., Сабитов Л.С. [и др.] Численное моделирование конструкций сооружений башенного типа в программных комплексах ANSYS и ЛИРА-САПР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 65–68.
5. Иоскевич А.В., Савченко А.В. Сравнение ПВК SCAD Office и Лира-САПР на примере расчета башни связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. 10(25). С. 7–21.
6. Кузнецов Д.Н., Сазыкин В.Г., Шпакова В.А. Исследование расчётной схемы пространственной решётчатой конструкции на примере пожарной вышки высотой 45 м // Современное строительство и архитектура. 2017. № 3(07). С. 35–39.
7. Алёхин А.М., Кроник М.В., Кирсанов Е.В. Влияние нагрузок и воздействий на выбор конструктивной формы узкобазой антенной опоры // Металлические конструкции. 2018. Т. 24, № 2. С. 61–72.
8. Голиков А.В., Михальчонок Е.А., Мельникова Ю.А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4(55). С. 53.
9. Silva J, G.S. da., Silva, P.C.C. da S. Vellasco, S.A.L. de Andrade, M.L.R. de Olivera Anevaluation of structural steel design systems for transmission and telecommunication towers // ProceeAbbas In : Theoretical Foundations in Civil Engineering. Warsaw. 2009. No. 17. Pp. 185-192.
10. Горев В.В. Общая устойчивость сжатых сквозных стержней // Известия ВУЗ. Строительство и архитектура. 1983. № 1. С. 39–40.
11. Белый Г.И. Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1347–1357.

12. Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю. Устойчивость поясов антенных опор // Вестник СибАДИ. 2022; 19(6): 936–948. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

13. Голиков А.В., Терновой В.А., Габова В.В. Метод усиления решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Вып. 1(86). С. 18–32.

14. Закурдаева О.Н., Голиков А.В. Повреждаемость антенно-мачтовых сооружений сотовой связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 4(67). 2018. С. 1–12.

15. Белый Г.И., Лобовский М.О. Устойчивость ветвей решётчатых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2(97). С. 18–29.

16. Белый Г.И., Гарипов А.И. Запредельные напряженно-деформированные состояния в поперечных сечениях элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4(93). С. 16–30.

17. Грудев И.Д., Артёмов А.А. Прямой метод расчета сжатых элементов стальных конструкций в составе сооружения // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 6. С. 34–35.

18. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 12. С. 1559–1566.

REFERENCES

1. Krasnoshchekov Yu.V. Efficiency of antenna supports erected on a limited area. *Vestnik SibADI*. 2012; 1(27): 80–85. (In Russ.)

2. Golikov A.V., Mikhachonok E.A., Melnikova Yu.A. Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower elements. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019; No. 4(55): 53. (In Russ.)

3. Galay V.S. Stability of steel centrally compressed rods in the methods of SP 16.13330.2011 and EN 1993-1-1. *Alfabuild*. 2019: 82–91. (In Russ.)

4. Ziganshin A.D., Akhtyamova L.Sh., Sabitov L.S., etc. Numerical simulation of tower-type structures in ansys and lira-cad software systems. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021; No. 2: 65–68. (In Russ.)

5. Ioskevich A.V., Savchenko A.V. Comparison of PVC SCAD Office and Lira-CAD on the example of calculating the communication tower. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 10(25). 2014: 7–21. (In Russ.)

6. Kuznetsov D.N., Sazykin V.G., Shpakova V.A. Investigation of the design scheme of a spatial lattice structure using the example of a 45 m high fire tower. *Modern Construction and Architecture*. 2017; No. 3(07): 35–39. (In Russ.)

7. Alyokhin A.M., Kronik M.V., Kirsanov E.V. The influence of loads and impacts on the choice of

the structural shape of a narrow-base antenna support. *Metallicheskie konstruksii*. 2018; Vol. 24. № 2: 61–72. (In Russ.)

8. Golikov A.V., Mikhachonok E.A. Determination of the rational constructive form of cellular towers. *Engineering journal of Don*. 2019; Vol. 20. No. 2: 163–173. (In Russ.)

9. Silva J, G.S. da., Silva, P.C.C. da S. Vellasco, S.A.L. de Andrade, M.L.R. de Olivera Anevaluation of structural steel design systems for transmission and telecommunication towers. *ProceeAbbas In: Theoretical Foundations in Civil Engineering*. Warsaw. 2009; 17: 185–192.

10. Gorev V.V. General stability of compressed through robs. *Izvestija VUZ. Stroitel'stvo i arhitektura*. 1983; 4: 30–33. (In Russ.)

11. Belyy G.I. Calculation of the stability of lattice elements of steel structures. *Vestnik MGSU*. 2022; Vol. 17. № 10: 1347–1367. (In Russ.)

12. Krasnoshchekov Yu.V., Zapoleva M.Y. Stability of antenna support belts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(6): 936–948. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

13. Golikov A.V., Ternovoy V.A., Gabova V.V. Method of reinforcement of lattice towers. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; No. 1(86): 18–32. (In Russ.)

14. Zakurdaeva O.N., Golikov A.V. Damage to antenna-mast structures of cellular communications. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 4(67): 1–12. (In Russ.)

15. Belyy G.I., Lobovskiy M.O. Stability of branches of lattice elements of steel structures. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2023; № 2(97): 18–29. (In Russ.)

16. Belyy G.I., Garipov A.I. Exorbitant stress-strain states in cross-sections of elements of steel structures. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2022; № 4(93): 16–30. (In Russ.)

17. Grudev I.D., Artyomov A.A. Direct method of calculation of compressed elements of steel structures in the structure. Moscow. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2003; 6: 34–35. (In Russ.)

18. Perelmutter A.V. Using the resistance criterion to assess the ultimate condition of the structure. *Vestnik MGSU*. 2021; Vol. 16. № 12: 1559–1566. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Краснощеков Ю.В. Общая идея работы, разработка расчетной модели, написание статьи.

Заполева М.Ю. Постановка задачи, сбор и анализ материалов, выполнение расчетов.

COAUTHORS CONTRIBUTION

Krasnoshchekov Y.V. Idea of the work, development of a computational model, writing an article.

Zapoleva M.Y. Setting the task, collecting and analysing the material, performing calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Краснощеков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6695-1648>, **SPIN-код:** 1100-2040, e-mail: uv1942@mail.ru

Заполева Мария Юрьевна – гл. инженер проекта ООО СМУ-175 «Радиострой» (644082, ул. Энгельса, 1, Омск, Омская обл.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7123-6457>, e-mail: m18kras@spartak.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. Sci., Associate Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6695-1648>, **SPIN-code:** 1100-2040, e-mail: uv1942@mail.ru

Maria Y. Zapolova – Chief Project Engineer, ООО SMU-175 Radiostroi (644082, 1, Engelsa str., Omsk, Omsk region), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7123-6457>, e-mail: m18kras@spartak.ru

Научная статья
УДК 69.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>
EDN: BKBYOI



ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен ✉

Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия
✉ ответственный автор
sizen0263@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение надлежащего качества строительства – одна из злободневных задач современности. Потребители ждут от застройщиков дешевой продукции в виде коммерческой или жилой недвижимости, которая соответствовала бы всем требуемым показателям качества. Большинство аварий в монолитном строительстве происходит по причине несоблюдения установленных технологических параметров в условиях низких температур. Целью исследования является разработка основ оценки качества бетонных работ при отрицательных температурах (при зимнем производстве работ) на основе результатов исследований технологических параметров зимнего бетонирования, их влияния на качество и безопасность возводимых монолитных конструкций промышленных и гражданских зданий (сооружений).

Материалы и методы. В исследовании использовался метод аппроксимирующих распределений случайных величин, экспертные оценки, теория многочисленных начал, математическая статистика. Эксперименты ставились в лабораториях Донского государственного технического университета, а также в условиях реального производства бетонных работ зимой на строительной площадке. В работе применен корреляционно-регрессионный анализ зависимости организационно-технологических причин возникновения несоответствий (факторов) и показателей качества производства бетонных работ. Была обработана статистическая информация о повреждениях конструкций и обрушении зданий в ходе их эксплуатации. Для принятия организационно-технологических решений повышения качества производства бетонных работ предлагается принять за показатель уровня качества показатель влияния дефектов на несущую способность зданий.

Результаты. Практическим и экспертным методом установлены наиболее значимые причины (факторы) возникновения несоответствий на уровень качества производства бетонных работ. Установлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на показатель изменения несущей способности зданий. Определены показатели качества при производстве бетонных работ в условиях низких температур. На основе чего предложены методы оценки качества зимнего бетонирования.

Обсуждение и заключение. Практическая ценность работы состоит в разработке методического инструмента для создания нормативной базы при проведении операционного строительного контроля производства монолитных и сборно-монолитных строительно-монтажных работ в условиях воздействия низких температур, а также при приемочном контроле соответствия законченных строительных объектов требованиям качества. Даны предложения по установлению нормативных допусков, способы повышения технологичности применяемой оснастки, разработан новый метод проектирования технологии зимнего бетонирования, метод контроля качества, ориентированный на обеспечение конструкционной безопасности. Развивая исследование, можно разработать методы расчета параметров качества при меняющихся технологиях производства работ, а также установить новые показатели для регулирования требуемого уровня качества и безопасности возводимых зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: качество строительства, авария, показатели качества, экспертная оценка, фактор, зимнее бетонирование, организационно-технологические решения

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

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: Маилян Л.Д., Сизен Н.О. Оценка показателей качества в строительстве // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 464–474. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>

© Маилян Л.Д., Сизен Н.О., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>
EDN: BKBYOI

ASSESSMENT OF QUALITY INDICATORS IN CONSTRUCTION

Lia D. Mailyan, Nikolai O. Sizen ✉
Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russia
✉ corresponding author
sizen0263@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Ensuring proper quality of construction is one of the pressing challenges of our time. Consumers expect cheap products from developers in the form of commercial or residential real estate that meet all the required quality indicators. Most accidents in monolithic construction occur due to non-compliance with technological procedures at low temperatures. The purpose of the study is to develop a framework for assessing the quality of concrete work at subzero temperatures (during winter work) based on the results of studies of technological parameters of winter concreting, their impact on the quality and safety of erected monolithic structures of industrial and civil buildings (structures).

Materials and methods. The study used the method of approximating distributions of random variables, expert estimates, the theory of multiple principles, and mathematical statistics. The experiments were carried out in the laboratories of the Don State Technical University, as well as in the conditions of actual concrete work on a construction site in winter. The work uses a correlation-regression analysis of the dependence of the organizational and technological causes of inconsistencies (factors) and quality indicators of concrete work production. Statistical information on structural damage and collapse of buildings during their operation was processed. To make organizational and technological decisions to improve the quality of concrete work, it is proposed to take the influence of defects on the load-bearing capacity of buildings as an indicator of the quality level.

Results. Using practical and expert methods, the most significant reasons (factors) for the occurrence of inconsistencies in the level of quality of concrete work production have been established. Factors have been identified that have the greatest influence on the change in the load-bearing capacity and reliability of buildings and structures being erected when performing the main types of construction and installation work. The nomenclature of technological quality indicators during winter production of concrete work, their influence on quality substantiated, and methods for assessing the quality of winter concreting technology are developed. Quantitative indicators of the quality of construction of monolithic reinforced concrete structures were obtained.

Discussion and conclusions. The practical value of the work lies in the development of a methodological tool for creating a regulatory framework for operational construction control of the production of monolithic and prefabricated monolithic construction and installation works under conditions of exposure to low temperatures, as well as for acceptance control of compliance of completed construction projects with quality requirements. Proposals are given for establishing regulatory tolerances, ways to improve the manufacturability of the equipment used, a new method for designing winter concreting technology, and a quality control method focused on ensuring structural safety have been developed. By developing the research, it is further possible to develop methods for calculating technology parameters taking into account technological variability, as well as establish new indicators to regulate the required level of quality and safety of buildings being built.

KEYWORDS: quality of construction, accident, quality indicators, expert review, factor, winter concreting, organizational and technological decisions

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

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. Mailyan L.D., Sizen N.O. Assessment of quality indicators in construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 464-474. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>

© Mailyan L.D., Sizen N.O., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надлежащего качества строительства – одна из злободневных задач современности. Потребители ждут от застройщиков дешевой продукции в виде коммерческой или жилой недвижимости, которая удовлетворяла бы все требуемые показатели качества. Применение новых материалов приводит, с одной стороны, к удешевлению и ускорению строительства, а с другой – может снижать некоторые показатели качества, в том числе такие, о которых застройщики и подрядчики первоначально могут даже не задумываться. Важным является изучение организационно-технологических проблем контроля качества работ в строительстве, их мониторинг, анализ, разработка и внедрение на основании результатов корректирующих мер (мероприятий), направленных на совершенствование методик обеспечения контроля качества в процессе производства строительно-монтажных работ, в том числе влияющих на несущую способность, надежную и безопасную эксплуатацию конструкций, строящихся зданий и сооружений.

Однако встречаются недостатки, которые можно было бы устранить путем проведения мониторинга качества бетона в течение полного периода набора им прочности. Согласно статистическим данным, большинство аварий в монолитном строительстве происходит по причине несоблюдения технологических требований производства бетонных работ, причем, как правило, в зимних условиях [1, 2].

В настоящее время производится строительный контроль, направленный на обеспечение соответствия выполняемых видов строительно-монтажных работ требованиям проектной и нормативно-технической документации [3, 4]. В существующей нормативно-технической документации не определены количественные показатели контролируемых параметров зимнего бетонирования, их влияние на показатели качества и безопасности монолитных конструкций.

Для решения вышеназванных проблем необходимы исследования контролируемых параметров качества возведения зданий и

сооружений в монолитном строительстве. При этом особое внимание следует уделить проблеме их обеспечения при производстве бетонных работ в зимних условиях, исследованию отклонений технологических параметров зимнего бетонирования, обоснованию номенклатуры контролируемых параметров зимнего бетонирования, влиянию отклонений на показатели качества и безопасности монолитных конструкций.

Научные исследования в области обеспечения технологических требований и организации производства строительно-монтажных работ для достижения достаточного уровня качества содержатся в трудах таких известных ученых, как А.А. Афанасьев, А.А. Гусаков¹, Л.М. Колчеданцев, Б.М. Красновский², Ю.Б. Монфред, М.Д. Спектор, В.И. Теличенко и др. Однако данными учеными не были глубоко исследованы вопросы взаимосвязи качества и надежности строительно-монтажных работ.

Анализ дефектов, обрушений и аварий в строительстве проводили А.Х. Байбурун³, Р.И. Вейц, А.Г. Ройтман, Б.В. Сендеров, И.А. Физдель⁴ и др.

В изучение дефектов, допускаемых при строительстве, весомый вклад внесли ученые В.Г. Гвоздев, В.Л. Клевцов, М.Н. Лашенко, И.А. Физдель и др.

Вопросы обеспечения надлежащего качества в зимних условиях или районах Крайнего Севера исследовали Р.И. Исмаилов, Б.М. Красновский, С.Д. Токарь и др. [2, 5, 6].

Комплексные модели оценки качества в строительстве строили А.Х. Байбурун, А.Н. Дроздова, Л.Б. Зеленцов, Р.И. Исмаилов, С.Д. Токарь и др. [4, 6, 7, 8, 9].

Однако никем из вышеуказанных учёных не была разработана модель оценки качества бетонных работ монолитного и сборно-монолитного возведения промышленных и гражданских зданий (сооружений) при производстве работ в зимних условиях. По нашему мнению, важно определить характеристики аппроксимирующих распределений технологических параметров зимнего бетонирования, провести исследования отклонений техноло-

¹ Гусаков А. А. Системотехника строительства. М.: Стройиздат, 1983. 440 с.

² Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М.: ГАСИС, 2004. 470 с.

³ Байбурун А.Х. Комплексная оценка качества возведения гражданских зданий с учетом факторов, влияющих на их безопасность. СПб, 2012. 408 с.

⁴ Физдель И.А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1987. 335 с.

гических параметров зимнего бетонирования при воздействии внешних факторов.

Нами было проведено исследование с последующим практическим внедрением, дополняющее разработки перечисленных выше учёных, с упором на контроль качества производства монолитных и сборно-монолитных строительно-монтажных работ в условиях воздействия низких температур.

Целью проведённого нами исследования является выработка предложений по улучшению качества зимнего бетонирования (производства работ при отрицательных температурах). В силу чего мы поставили перед собой следующие задачи:

- 1) провести анализ допусков отклонений технологических параметров зимнего бетонирования;
- 2) выявить влияние отклонений на показатели качества и безопасности монолитных конструкций;
- 3) обосновать номенклатуру контролируемых параметров зимнего бетонирования;
- 4) выработать метод проектирования технологии зимнего бетонирования с учетом отклонений технологических параметров;
- 5) выработать предложения для разработки проектов производства работ (ППР) и технологических карт (ТК) на основе результатов производственной апробации.

Объектом данного исследования являются монолитные и сборно-монолитные бетонные строительно-монтажные работы, их производство при отрицательных температурах, системы менеджмента качества строительных организаций.

Предмет исследования – параметры качества технологических процессов производства монолитных и сборно-монолитных работ в условиях воздействия отрицательных температур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования мы использовали метод аппроксимирующих распределений случайных величин, т.е. выбирали аппроксимирующее распределение случайных значений технологических параметров зимнего бетонирования эмпирическим путем с последующей проверкой адекватности выбранной модели реальными данными. Использовали, кроме того, метод экспертных оценок и метрологический (лабораторный) контроль качества, выполненный на базе Донского государственного технического университета, а также теорию-

математическую статистику. Эксперименты ставились также в условиях реального производства бетонных работ зимой на строительной площадке. В расчетах использовались общеизвестные программы «ЛИРА», Statistica, MatLab и др.

В работе применен корреляционно-регрессионный анализ зависимости организационно-технологических причин возникновения несоответствий (факторов) и показателей качества производства бетонных работ.

Информация об авариях, случаях повреждений и обрушений зданий, их частей и конструктивных элементов на основе изучения и анализа причин возникновения дефектов и их последствий необходима для выявления «узких» и наиболее опасных моментов в ходе строительства.

Анализ информации об авариях, обрушениях конструкций зданий проводился на основе выявления причин дефектов, чтобы определить наиболее рискованные стороны производства строительных работ.

Из анализа статистики было установлено, что более половины аварий происходят из-за низкого качества строительно-монтажных работ. Примерно в 80% случаев причинами аварий зданий являются критические дефекты [7, 10].

Причинами аварий в зданиях на 60–80% является низкое качество выполнения строительно-монтажных работ [5, 11].

Строительные дефекты при невыгодном сочетании факторов становятся причинами аварий. При этом чем выше доля зданий и сооружений с критическими дефектами, тем выше потенциальная опасность создания аварийной ситуации [12].

Анализ показал, что одной из причин обрушений и недопустимых деформаций конструкций является нарушение правил производства работ, а именно: некачественное закрепление панелей на сварочных прихватках; невыполнение проектного опирания конструкций; низкое качество сварки; нарушение технологической последовательности работ [13].

Аварии в зданиях из монолитного железобетона вызываются, как правило, нарушением технологии производства работ, особенно при возведении зданий в зимних условиях. Недостаточное уплотнение бетонной смеси, нарушение режима набора прочности бетона в ряде случаев являются основными причинами аварий [10, 13, 14].

Таблица 1

Градация показателей качества

Источник: составлено авторами на основе методики, предложенной А.Х. Байбуриным [4, 7].

Table 1

Ranging of quality indicators

Source: compiled by the authors based on the methodology proposed by A.Kh. Baiburin [4, 7]

Качество	Полезные	Внешние	1. Безопасность 2. Надежность 3. Экологичность
		Внутренние	4. Конкретная потребительская ценность 5. Комфорт 6. Доступность
	Сопутствующие		7. Технологичность 8. Экономичность 9. Унификация 10. Юридическая составляющая

На практике регулирование качества строительства происходит по параметрам несущей способности выбранной конструкции. Повышение качества в условиях строительной площадки возможно путем повышения точности процессов, а это можно сделать, модифицировав работы или оснастку, а также повысив квалификацию работников и/или усилив контроль [7]. Однако последние два способа требуют значительных дополнительных вложений.

Если же повысить точность процессов невозможно, то, скорее всего, имеют место системные сбои в организации контроля качества работ или в целом в организации производства. Тогда нужно применять методы теории многочисленных начал с целью регулирования показателей качества системы. Для различных потенциальных зон разрушения можно рассчитать риск и сравнить его с допустимым значением.

Полагаем, что показатели качества можно разделить на две большие группы – полезные (способные приносить пользу потребителю или заказчику) и сопутствующие, т.е. не имеющие важности для потребителя, но несущие определенную затратную нагрузку, избавиться от которой нельзя (производственные, стоимостные, дополнительные). Полезные показатели, в свою очередь, поделим на внутренние и внешние (таблица 1).

Взаимодействие человека с окружающей средой и интересующей системой определяют внешние показатели качества, а именно показатели безопасности, надежности и экологичности.

Внутренние показатели разделим на подгруппы: конкретная потребительская ценность – ценность, связанная с выполнением определенной функции; показатели комфорта – удобства нахождения человека в жилом

помещении, офисе или в производственном цеху; доступности – возможности легко попасть в конкретное помещение.

В группу затратных показателей качества входят показатели технологичности, экономичности, унификации, а также юридическая составляющая и другие, характеризующие затраты на создание и функционирование системы [4].

Определить вес того или иного показателя можно путем нормирования объемов производства работ в натуральном и/или в стоимостном выражении.

Для расчета веса того или иного показателя мы использовали метод парных сравнений. Этот метод позволил нам определить вес выбранных параметров качества: прочность, теплопроводность, устойчивость, герметичность и внешний вид. Исходя из сути метода парных сравнений, применим шкалу важности [15]: 1 – равная важность; 2 – почти равная важность; 3 – умеренное превосходство; 4 – уверенное превосходство; 5 – весьма существенное превосходство; 6 – значительное превосходство; 7 – сильное превосходство; 8 – весьма сильное превосходство; 9 – очень сильное превосходство.

Главная полезная функция несущих конструкций – есть собственно несущая способность, а она определяется в основном прочностью. Другие параметры тоже имеют определенную степень важности. Отсюда следует, что они могут иметь взаимное влияние друг на друга. И мы построили матрицу приоритетов (таблица 2), выражающую вес выбранных параметров.

Полученные приоритеты по весу параметров можно использовать для расчета общего показателя качества (1):

Таблица 2
Матрица приоритетов для параметров
Источник: составлено авторами.

Table 2
Priority matrix for parameters
Source: compiled by the authors.

Параметры	Прочность	Теплопроводность	Устойчивость	Герметичность	Внешний вид	Ср. геометрич.	Вес
Прочность	1	5	7	6	4	3,844	0,39
Теплопроводность	1/5	1	1/4	1/8	2	3,170	0,11
Устойчивость	1/7	4	1	4	3	3,201	0,35
Герметичность	1/6	8	1/4	1	3	3,565	0,27
Внешний вид	1/4	1/2	1/3	1/3	1	2,352	0,08

$$q_k = q_n^{0,39} q_m^{0,11} q_y^{0,35} q_e^{0,27} q_e^{0,08}, \quad (1)$$

где q_n , q_m , q_y , q_e , q_e – показатели по группе параметров прочности, теплопроводности, устойчивости, герметичности и внешнего вида с полуженными показателями веса.

Затем можно составить модель обобщенной оценки качества. Составим её на основе взятого из таблицы 2 среднего геометрического показателя(2):

$$K_{оок} = v \cdot K_{ym}^m \cdot (K_b K_T)^n \cdot (K_w K_u)^p \cdot (K_s K_k)^t, \quad (2)$$

где z – запретительный коэффициент, который будет равен нулю, если коэффициент падения несущей способности K_s сравняется с предельным его значением или предельного значения достигнет коэффициент падения безопасности конструкций K_b ; а в остальных

случаях величина запретительного коэффициента $z=1$, это значит, что система обеспечивает корректную оценку;

K_{ym} – коэффициент, учитывающий уровень менеджмента качества строительства;

K_b – коэффициент бездефектности;

K_T – коэффициент точности процессов;

K_w , K_u – коэффициенты соответственно системных и случайных дефектов;

K_s – показатель падения несущей способности (прочности);

K_k – коэффициент падения безопасности конструкции;

m , n , p и t – показатели веса [7].

Показатели веса определяются путем анализа матрицы приоритетов (таблица 3) и по альтернативному признаку «соответствует – не соответствует».

Таблица 3
Анализ коэффициентов модели обобщенной оценки
Источник: составлено авторами.

Table 3
Analysis of coefficients of the generalized estimation model
Source: compiled by the authors.

	K_{ym}	K_b	K_T	K_w	K_u	K_s	K_k	Σ^+	Весомость
K_{ym}	0	+	+	+	+	-	-	4	0,19
K_b	-	0	=	+	+	-	-	2,5	0,12
K_T	-	=	0	+	+	-	-	2,5	0,12
K_w	-	-	-	0	=	-	-	0,5	0,025
K_u	-	-	-	=	0	-	-	0,5	0,025
K_s	+	+	+	+	+	0	=	5,4	0,26
K_k	+	+	+	+	+	=	0	5,5	0,26
Σ^-	4	2,5	2,5	0,5	0,5	5,4	5,5	20,9	1,00

Символ «+» в таблице отражает преобладание показателя, стоящего по строке над коэффициентом по столбцу, символ «=» означает равнозначность сравниваемых коэффициентов.

Все показатели, входящие в(2), изменяются от 0 до 1, за исключением показателей точности, прочности и безопасности. Они могут иметь значение более 1.

Если Коок менее единицы, то качество работ не соответствует нормам, а если Коок более единицы, то качество работ можно считать идеальным, и если Коок=0, то качество точно соответствует установленным нормам.

Для принятия организационно-технологических решений повышения качества производства бетонных работ мы предложили реализовать мероприятия, связывающие организационно-технологические причины возникновения дефектов с показателями качества. Причем причины нужно ранжировать по степени их влияния на качество. Для этого мы решили провести экспертную оценку. В качестве экспертов были отобраны 22 специалиста организаций-застройщиков и генеральных подрядчиков, специализирующихся на строительном контроле, причем имеющих существенный стаж работы в этой области.

Сначала на основании еженедельных и ежемесячных отчетов отдела строительного контроля об организации контроля качества выполняемых видов работ, количеству выявленных несоответствий по причинам их возникновения, руководителем отдела строительного контроля (главным экспертом) совместно с экспертами (специалистами) определялся перечень наиболее часто повторяющихся организационно-технических причин (факторов) возникновения несоответствий, влияющих на качество работ.

Далее эксперты непосредственно ранжировали выявленные на первом этапе факторы. Согласование мнений проводилось методом расчета коэффициента согласия Кендалла [16].

В процессе проведения строительного контроля практическим путем был установлен ряд основных причин возникновения несоответствий в процессе производства бетонных работ, данных причин (факторов) значительное количество. В связи с этим причины (факторы) определены в группы, среди которых выделены наиболее значимые и часто повто-

ряющиеся. Для дальнейшего исследования стало необходимо произвести экспертную оценку организационно-технических причин (факторов) возникновения несоответствий, выявленных в процессе проведения строительного контроля, по степени значимости на качество производства основных видов работ методами математической статистики – определением согласованности экспертов, с помощью коэффициента конкордации (согласия) Кендалла.

За показатель уровня качества – основную характеристику – был принят показатель влияния выявленных дефектов на несущую способность возводимых зданий H_R , а также коэффициент вариации данного показателя влияния $V(R)$. Указанные показатели рассмотрены в качестве откликов. Для земляных работ исследовалось влияние причин (факторов) на прочность и устойчивость земляного полотна основания возводимых зданий и сооружений – достижение требуемого среднего коэффициента послойного уплотнения (степени уплотнения), которое является одной из самых значимых и основных проблем при производстве данных видов работ. Для свайных работ в качестве основных выявленных дефектов были рассмотрены фактические отклонения положения свай в плане, превышающие предельно допустимые значения [17], в процессе контроля были приняты допустимые отклонения: $0,2d$ для забивных свай при их однорядном расположении и $0,3d$ при расположении свай в два и три ряда в лентах или кустах свай, где d – диаметр круглый или максимальный размер прямоугольной сваи.

В бетонных работах при бетонировании монолитных железобетонных фундаментов в качестве основных выявленных дефектов были рассмотрены фактические показатели качества бетона по прочности в бетонируемых конструкциях по ГОСТ 10180, ГОСТ 22690, ГОСТ 26633, с оценкой и приемкой по ГОСТ 18105 [17].

Оценка нормальности распределения показателей факторов выполнялась нами с использованием методов линейной регрессии [12, 18]. Полученные данные позволили считать, что результаты исследования вполне достоверны. Применение критериев Колмогорова и Пирсона тоже подтвердили правомочность примененных методик.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведённые исследования позволили:

1. Структурировать параметры качества производства бетонных работ в условиях низких температур.
2. Определить точность параметров качества бетонирования конструкций.
3. Получить количественные показатели качества устройства монолитных железобетонных конструкций (плиты, фундаментов, колонн), состоящих из бетона В30П2W8F150-ГОСТ 7473–2010 для применения в дальнейшем с целью корректировки точности технологических процессов.

Практическим путем, а также экспертным методом установлены следующие наиболее значимые причины (факторы) возникновения несоответствий на уровень качества производства бетонных работ:

1. Соблюдение технологии производства строительно-монтажных работ – $T_{\text{смп}}$.
2. Уровень качества поставляемых материалов, изделий, конструкций и оборудования – K_m .
3. Уровень квалификации инженерно-технических работников, рабочих, занятых в процессе производства строительно-монтажных работ – U_k .
4. Комплектность, качество и своевременность предоставления проектной документации и качество составленного договора подряда – P_k .
5. Уровень организации, полнота контроля качества производства строительно-монтажных работ – O_k .
6. Компетентность экспертов строительного контроля как со стороны генподрядчика, так и со стороны заказчика – $Э_k$.
7. Уровень обеспеченности оборудованием, оснасткой, инструментом и инвентарем – I_y .

В результате оценки факторов качества мы пришли к выводу, что связь между P_k и другими признаками отсутствует. Объяснением этому является факт осуществления контроля, при наличии соответствующего вида работ, выполнение которых без конструктивных проектных решений не представляется возможным, в случае выявленных несоответствий в проектной документации в процессе производства работ, корректировка производилась с участием строительного контроля заказчика

и представителя проектной организации – авторского надзора на месте производства работ, с записью в журнале авторского надзора или изменениями в проектной документации, с выдачей в установленном порядке.

Основное влияние на показатель несущей способности и надежности возводимых зданий и сооружений при выполнении основных видов строительно-монтажных работ (H_R) оказывают следующие основные причины возникновения несоответствий (факторы):

- соблюдение технологии производства строительно-монтажных работ $T_{\text{смп}}$;
- уровень организации, полнота контроля менеджмента качества строительного производства O_k ;
- качество материалов и иных производственных запасов и основных средств: изделий, конструкций, оборудования K_m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования производства строительных работ в зимних условиях (иных условиях низких температур) факторы качества были анализируемы по степени их влияния на уровень качества следующим образом:

- 1) уровень организации, полнота контроля менеджмента качества строительного производства – O_k ;
- 2) соблюдение в полном объеме установленной технологии производства работ – $T_{\text{смп}}$;
- 3) качество материалов и иных производственных запасов и основных средств: изделий, конструкций, оборудования – K_m ;
- 4) уровень квалификации работников предприятия (как менеджмента, инженерного состава, так и рабочих основного производства строительных работ) – U_k ;
- 5) компетентность экспертов строительного контроля как со стороны генподрядчика, так и со стороны заказчика – $Э_k$;
- 6) уровень обеспеченности оборудованием, оснасткой, инструментом, прочими основными средствами и производственными запасами – I_y .

Научная ценность нашего исследования состоит в следующем:

- определены факторы в области организации и технологии, влияющие на возникновение дефектов в строительстве;
- предложена методика для обеспечения качества основных видов строительно-мон-

тажных работ и безопасности возводимых строительных конструкций, зданий и сооружений, при их производстве посредством предупредительного контроля;

– исследованы закономерности изменения параметров качества основных видов строительно-монтажных работ.

Практическая ценность работы состоит в формировании основ проведения операционного строительного контроля производства монолитных и сборно-монолитных строительно-монтажных работ в условиях воздействия низких температур, а также при приемочном контроле соответствия законченных строительством объектов требованиям качества и безопасности.

Полученные результаты статистического и экспериментального анализа внедрены в научное обеспечение промышленного и гражданского строительства при строительстве объектов нефтегазодобывающего комплекса. Даны предложения по установлению нормативных допусков, способы повышения технологичности применяемой оснастки, разработан новый метод проектирования технологии зимнего бетонирования, метод контроля качества, ориентированный на обеспечение конструкционной безопасности. Даны рекомендации по совершенствованию проектов производства работ (ППР) и технологических карт.

Развивая исследование, в дальнейшем можно было бы установить новые показатели определения точности процессов для обеспечения должного качества, а также безопасности монтируемых строительных конструкций как в обычных условиях производства, так и в особых, например, в заболоченной местности и высокогорных районах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тилинин Ю.И., Животов Д.А. Технологии строительства зданий в городских условиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУАОВО «АГАСУ», 2023. № 1(43). С. 32–37. DOI:10.52684/2312-3702-2022-43-1-32-37
2. Markouski M., Bursau M., Obukhav A., Dimitriadi N. Technology of temple monolithic structures construction process using modern formwork systems. In: Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 5. 2013. pp. 122–138.
3. Шихмурадова И.Ш., Дагирова Д.М. О необходимости соблюдения специальных условий для обеспечения качества строительно-монтажных работ // Региональные проблемы преобразования

экономики. 2022. № 3. С. 42–50. DOI:10.26726/1812-7096-2022-3-42-50

4. Румянцев Е.В., Соловьев В.Г., Байбурин А.Х. Влияние замораживания на прочность сцепления в бетонных швах при зимнем бетонировании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22. № 3. С. 61–70. DOI: 10.14529/build220307

5. Исмаилов Р.И. Применение статистических методов для определения качества строительства магистральных трубопроводов в районах Крайнего Севера // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/7001> (дата обращения: 20.03.2024).

6. Токарь С.Д. Качество строительства в обеспечении надежности и безопасности. Пути решения проблем // Инновации в жизнь. 2017. № 4(23). 261 с. EDN: XSFLQT

7. Baiburin A.Kh., Golovnev S.G. Quality and reliability estimation of airfield runway // The Proceedings of the International Geotechnical Symposium «Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction» – Yuzhno-Sakhalinsk. Russia–Sapporo, Japan, 2007. P. 271–272.

8. Зеленцов Л.Б., Зеленцов А.Л., Островский К.Н. Оптимизационные модели системы менеджмента качества в строительстве // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 221–224. EDN: RWITOT

9. Ismailov R., Pogorelov V. Mathematical modeling of the process of quality control of construction products [Электронный ресурс] // MATEC Web of Conferences – 2017. Режим доступа: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/mateconf_spbw2017_08009/mateconf_spbw2017_08009.html (дата обращения: 24.03.2024).

10. Олейник П.П., Куренков О.Г. Оценка выявленных фактических отклонений несущих монолитных железобетонных конструкций и определение закона их распределения для оптимизации контроля качества производства строительных работ // Строительное производство. 2020. № 2. С. 125–139. EDN: GJBTVI. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_125

11. Исмаилов Р.И. Организация диспетчерской службы с позиции повышения качества строительства магистральных трубопроводов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7830> (дата обращения: 22.03.2024).

12. Байбурин А.Х., Никоноров С.В. О совершенствовании нормативов качества возведения жилых зданий // Жилищное строительство. 2005. № 8. С. 8–9. EDN: JXNZWR

13. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics // Sustainability. 2021. Vol. 13(24). DOI: 10.3390/su132413607.

14. Подмазова С.А., Соколов Б.С., Глушкова М.В., Дмитриев Н.С., Бублиевский А.Г. Входной контроль качества бетона на месте строитель-

ства // Технологии бетонов. 2020. № 3-4. С. 46–49. EDN: IEONQR

15. Зеленцов Л.Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. EDN: BZKXLZ. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26.

16. Дроздова А.Н. Внедрение автоматизированных информационных систем в контроль качества строительства // Академическая публицистика. 2022. № 12-2. С. 611–614. EDN: ZQBCNY

17. Совет Ж.К., Ниязбекова Р.К. Инновационные аккредитованные лаборатории. Адаптивный контроль качества дорожного покрытия // Интернаука. 2021. № 3-1(179). С. 6–7. EDN: JRRRGQ

18. Юсупов А.Р. Перспективы внедрения и развития системы менеджмента качества в строительстве // Экономика и социум. 2023. № 12-2(115). С. 1148–1151. EDN: BOLEFY

REFERENCES

1. Tilinin Yu.I., Zhivotov D.A. Technologies for the construction of buildings in urban environments. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Priaspia*. 2023; 1(43): 32–37. DOI:10.52684/2312-3702-2022-43-1-32-37. (In Russ.)

2. Markouski M., Bursau M., Obukhav A., Dimitriadi N. Technology of temple monolithic structures construction process using modern formwork systems. In: *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 5. 2013. pp. 122–138.

3. Shihmuradova I.Sh., Dagirova D.M. On the need to comply with special conditions to ensure the quality of construction and installation work. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2022; 3: 42–50. DOI:10.26726/1812-7096-2022-3-42-50. (In Russ.)

4. Rumyantsev E.V., Solov'ev V.G., Bajburin A.H. The influence of freezing on the adhesion strength in concrete joints during winter concreting. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the South Ural State University]*. Series: Construction and architecture. 2022; 22; 3: 61–70. DOI: 10.14529/build220307. (In Russ.)

5. Ismailov R.I. Application of statistical methods to determine the quality of construction of main pipelines in the Far North]. *Engineering journal of Don*. 2021; 5. Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/7001> (accessed: 20.03.2024). (In Russ.)

6. Tokar' S.D. Quality of construction in ensuring reliability and safety. Ways to solve problems. *Innovacii v zhizn'*. 2017; 4(23): 261. EDN: XSFLQT (In Russ.)

7. Baiburin A.Kh., Golovnev S.G. Quality and reliability estimation of airfield runway. *The Proceedings of the International Geotechnical Symposium «Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction»* – Yuzhno-Sakhalinsk, Russia – Sapporo, Japan, 2007. P. 271–272.

8. Zelentsov L.B., Zelentsov A.L., Ostrovsky K.N. Optimization models of the quality management system in construction. *Nauchnoe obozrenie*. 2013; 11: 221–224. EDN: RWITOT. (In Russ.)

9. Ismailov R., Pogorelov V. Mathematical modeling of the process of quality control of construction products. *MATEC Web of Conferences* – 2017. Available at: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/mateconf_spbw2017_08009/mateconf_spbw2017_08009.html (accessed: 24.03.2024).

10. Olejnik P.P., Kurenkov O.G. Evaluation of identified actual deviations of load-bearing monolithic reinforced concrete structures and determination of the law of their distribution to optimize quality control of construction. *Construction production*. 2020; 2: 125–139. EDN: GJBTVI. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_125. (In Russ.)

11. Ismailov R.I. Organization of dispatch service from the perspective of improving the quality of construction of main pipelines. *Engineering journal of Don*. 2022; 7. Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7830>. (accessed: 22.03.2024). (In Russ.)

12. Bajburin A.H., Nikonorov S.V. On improving quality standards for the construction of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* (Housing Construction). 2005; 8: 8–9. EDN: JXNZWR. (In Russ.)

13. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics. *Sustainability*. 2021; 13(24). DOI: 10.3390/su132413607.

14. Podmazova S.A., Sokolov B.S., Glushkova M.V., Dmitriev N.S., Bubljevskij A.G. Incoming quality control of concrete at the construction site. *Tekhnologii betonov*. 2020; 3-4: 46–49. EDN: IEONQR. (In Russ.)

15. Zelencov L.B. Implementation of building projects of variable functional purpose. *Construction production*. 2021; 2: 26–32. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26. (In Russ.)

16. Drozdova A.N. Introduction of automated information systems in construction quality control. *Akademicheskaya publicistika*. 2022; 12-2: 611–614. EDN: ZQBCNY. (In Russ.)

17. Sovet Zh.K., Niyazbekova R.K. Innovative accredited laboratories. Adaptive quality control of road surfaces. *Internauka*. 2021; 3-1(179): 6–7. EDN: JRRRGQ. (In Russ.)

18. Yusupov A.R. Prospects for the implementation and development of a quality management system in construction. *Ekonomika i socium*. 2023; 12-2(115): 1148–1151. EDN: BOLEFY. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Маилян Л.Д. Формулирование темы, цели и задач исследования. Анализ разработанности темы другими учеными. Руководство процессом проведения работы, выбор методов. Подведение итогов, выявление результатов. Редактирование текста статьи.

Сизен Н.О. Сбор материалов и применение методов исследования. Сбор экспертной группы. Обработка полученных данных и представление их в виде таблиц. Подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Mailyan L.D. Abstract, introduction, conclusion writing, research results presentation, general editing.

Sizen N.O. Research materials and methods presentation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маилян Лия Дмитриевна – канд. экон. наук, доц., и.о. зав. кафедрой организации строительства Донского государственного технического университета (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>, **SPIN-код:** 3286-4625, e-mail: liya_mailyan@mail.ru

Сизен Николай Олегович – студент Донского государственного технического университета

(344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>, e-mail: sizen0263@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Liya D. Mailyan – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Organization of Construction» Don State Technical University (Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1, 344000), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>, **SPIN-код:** 3286-4625, e-mail: liya_mailyan@mail.ru*

*Nikolay O. Sizen – student Don State Technical University (Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1, 344000), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>, e-mail: sizen0263@gmail.com*

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех. Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.