

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



научный рецензируемый журнал

• ВЕСТНИК СИБАДИ •

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 17, № 2. 2020
Сквозной номер выпуска – 72

Vol. 17, no. 2. 2020
Continuous issue – 72

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-2

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 17, № 2. 2020. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 72
(VOL. 17, NO. 2. 2020. CONTINUOUS ISSUE – 72)**

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

Периодичность издания – 6 раз в год

Подписной индекс в каталоге

ОАО Агентство «Роспечать» 66000

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Rospechat Agency's catalog

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2020

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

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

05.05.04 – Дорожные строительные и подъёмно-транспортные машины (технические науки),
05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки),
05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),
05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),
05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),
05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),
05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),
05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

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

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 ВИНИТИ РАН;
научной электронной библиотеке «Киберленинка».

Журнал является членом:

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

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 24.04.2020. Дата выхода в свет 22.05.2020. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2020

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

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

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

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

05.22.08 – Management of the transportation process (Technical Sciences),

05.22.10 – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

05.23.01 – Building structures, buildings and facilities (Technical Sciences),

05.23.05 – Building materials and products (Technical Sciences),

05.23.08 – Technology and organization of construction (Technical Sciences),

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika

The Journal is a member of

the Directory of Open Access Journals (DOAJ),

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

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



Signed in print on 24.04.2020. Publication date is 22.05.2020. Format is 60 × 84 1/4.

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.

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

Mikhail S. Korytov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57035238500, **Researcher ID** B-5667-2015,
ORCID ID 0000-0002-5104-7568

Transport

Nikolai G. Pevnev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 16526820600

Evgeniy E. Vitvitskiy, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57193406974, **Researcher ID** N-9779-2017,
ORCID ID 0000-0002-0155-8941

Construction and architecture

Viktor V. Sirotiyuk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6602369365, **Researcher ID** B-7877-2019

Irina L. Chulkova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 12645632400,
ORCID ID 0000-0003-4451-2297

EDITORIAL BOARD

Tatiana V. Bobrova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57201362187, **Researcher ID** Y-3916-2018,
ORCID ID 0000-0002-0292-4421

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

Yuriy L. Vinnikov, Dr. of Sci. (Engineering), Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, Poltava, Ukraine
Scopus Author ID 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015,
ORCID ID 0000-0003-2164-9936

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

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

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

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

Vladimir N. Efimenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia
Scopus Author ID 56487473100

Askar Zh. Zhusupbekov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, ENU named after L.N. Gumilev, Astana, Kazakhstan
Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015

Vladimir V. Zyryanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University, Rostov on Don
Scopus Author ID 26424901100, **Researcher ID** A-5063-2014,
ORCID ID 0000-0002-5567-5457

Andrey S. Kondratenko, Cand. of Sci. (Engineering), Siberian State University of Railway Transport (SGUPS), IGD SB RAS, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 26423012100, **Researcher ID** Q-9926-2016,
ORCID ID 0000-0002-7214-0104

Sergey V. Korneev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Scopus Author ID 7006776195

Dmitriy N. Korotaev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6506823308

Pavel A. Korchagin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57200726308, **Researcher ID** M-8902-2017,
ORCID ID 0000-0001-8936-5679

Mark E. Koryagin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12794946600, **Researcher ID** M-1500-2013,
ORCID ID 0000-0002-1976-7418

Valeriy M. Kurganov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tver State University, Tver, Russia
ORCID ID 0000-0001-8494-2852

Sergey N. Leonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016,
ORCID ID 0000-0002-2378-3947

Valeriy S. Lesovik, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of RAASN, BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016
ORCID ID 0000-0002-2378-3947

Sergey A. Makeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
ORCID ID 0000-0002-2915-982X

Sergey A. Matveev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 56297305000,
ORCID ID 0000-0001-7362-0399

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sergey V. 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I.**ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ***Мартюченко И.Г., Зенин М.И.*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИНТОВОЙ ЛОПАСТИ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ	162
---	------------

Николаев В.А.

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРОМКИ ЛЕЗВИЯ КОНСОЛЬНОГО НОЖА С ГРУНТОМ.....	172
--	------------

Тюрменов И.С., Иванов С.Н., Краюшкин А.С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСКОРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОВАЛЬЦА КАТКА ДМ-617 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА	182
--	------------

Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ ПРИ РАЗРУШЕНИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ЕДИНИЧНЫМ РЕЖУЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ	196
--	------------

Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ.....	208
---	------------

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ*Монгуш С.Ч.*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ПАРКА НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН	220
---	------------

Трофимова Л.С.

МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГРУЗОВ В ГОРОДЕ	234
--	------------

Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА.....	248
---	------------

Цыганов А.В., Осинцев Н.А.

СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ КОНТРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	262
--	------------

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*Федюк Р.С., Баранов А.В., Тимохин Р.А.*

ОЦЕНКА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	274
---	------------

Шевелёв Д.А., Сиротюк В.В., Геращенко Е.А., Степанова Е.А.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКИ В Г. ОМСКЕ.....	286
--	------------

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Igor G. Martiuchenko, Maksim I. Zenin

INTERACTION OF A HELICAL BLADE OF A DRILLING TOOL WITH FROZEN GROUND	163
---	------------

Vladimir A. Nikolaev

ANALYSIS OF INTERACTION OF A CANTILEVER KNIFE BLADE WITH SOIL	173
--	------------

Ivan S. Tiuremnov, Sergey N. Ivanov, Arseniy S. Kraiushkin

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATIONS OF THE DM-617 VIBRATORY ROLLER USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNOLOGY	183
---	------------

Denis V. Furmanov, Vladimir S. Chizhov, Nikita E. Lysakov

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CUTTING RESISTANCE STRENGTH AT ASPHALT CONCRETE DESTRUCTION WITH A SINGLE CUTTING ELEMENT	197
--	------------

Roman A. Chukharev, Natalia E. Tarasova, Evgenii K. Chabutkin

SIMULATION OF IMPACT PROCESS OF SOIL COMPACTION	209
--	------------

PART II. TRANSPORT

Syldys Mongush

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF FORMING A REGIONAL EQUIPMENT FLEET OFGROUNND TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES.....	221
--	------------

Liudmila S. Trofimova

THE METHODOLOGY OF THE CURRENT PLANNING OF A MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE OPERATION FOR THE TRANSPORTATION OF GOODS IN THE CITY	235
--	------------

Fadeev A.I., Fomin E.V., Alhusseini S.

DETERMINATION OF THE THROUGHPUT CAPACITY OF STOP POINTS OF URBAN PUBLIC TRANSPORT	249
--	------------

Aleksandr I. Fadeev, Evgeny V. Fomin, Sami Alhusseini

THE SYSTEM OF ROLLING-STOCK PARAMETERS OF INTERMODAL PIGGYBACK TRANSPORTATION	263
--	------------

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Roman S. Fediuk, Andrey V. Baranov, Roman A. Timokhin

CRITICAL REVIEW OF METHODS FOR EVALUATING ACOUSTIC CHARACTERISTICS OR PREMISES	275
---	------------

Dmitry A. Shevelev, Viktor V. Sirotiuk, Elena A. Gerashchenko, Elena A. Stepanova

THE IMPACT ANALYSIS OF THE NOISE SCREENS ON THE EXAMPLE OF A TRANSPORT INTERCHANGE IN THE CITY OF OMSK	287
---	------------



Дорогие читатели!

Вот уже 90 лет Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, сохранив историческую индивидуальность, — основная кузница высококвалифицированных кадров для автодорожной отрасли, гарант основательной инженерной подготовки. Полученное в СибАДИ образование стало путевкой в жизнь для многих общественных, государственных и политических деятелей, руководителей крупных предприятий и организаций, известных дорожников, транспортников, архитекторов, строителей. Выпускники вуза составляют научную, промышленную, политическую и бизнес-элиту всей страны.

Приоритетное направление научной и инновационной деятельности университета — обеспечение в первую очередь предприятий дорожно-транспортного и строительного комплексов передовыми технологиями, техническими решениями и разработками мирового

уровня. Выполняются научно-исследовательские работы и подготовка кадров в области строительства и дорожной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации.

За 90-летнюю историю СибАДИ не поменял свою профильную направленность и сегодня является в России одним из базовых и единственным за Уралом автодорожным вузом.

Отвечая вызовам времени, СибАДИ принимает на себя миссию социального и экономического развития государства, реализация которой невозможна без теснейшего взаимодействия с индустриальными партнерами и участия в приоритетных национальных проектах.

В вузе успешно в рамках стратегического партнерства разрабатываются и реализуются образовательные программы, открываются базовые кафедры, новые лаборатории и научно-методические центры.

Реальность свидетельствует об изменении социально-экономических функций вуза: рядом с образовательной и научной деятельностью возникает разработка и трансфер технологий, коммерциализация продуктов академической науки и вывод их на рынок, создание новых бизнесов, управление интеллектуальной собственностью с целью получения прибыли.

Сегодня СибАДИ — это не просто вуз, все мы — наш коллектив, партнеры, выпускники — несокрушимая сила, изо дня в день создающая будущее, в котором жить нашим детям. Наша высшая цель — посредством цифровой трансформации, интеграции в глобальное пространство, формирования открытой экосистемы и инновационной инфраструктуры, подготовки востребованных специалистов и внедрения научных разработок в архитектурно-строительную и дорожно-транспортную отрасли улучшать уровень жизни людей.

Ректор СибАДИ,
главный редактор А.П. Жигadlo



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



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

УДК 624.139

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИНТОВОЙ ЛОПАСТИ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

И.Г. Мартюченко, М.И. ЗенинФГБОУ ВО «СГТУ имени Ю.А. Гагарина»,
г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Бурение мерзлых и вечномерзлых грунтов является одним из сложных и энергоемких процессов производства земляных работ. Существующие буровые инструменты недостаточно эффективны в использовании, т.к. реализуют энергоемкие процессы бурения и не всегда пригодны для различных типов грунтов. Перспективным является применение винтовых рабочих органов, реализующих процесс разрушения грунта менее энергоемкими видами деформаций. Целью проведенных экспериментальных исследований являлось изучение процесса взаимодействия винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым.

Материалы и методы. В статье описана методика проведения экспериментальных исследований изучения процесса взаимодействия винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом и исследуемые модели бурового инструмента. Изучено влияние геометрических параметров винтового бора на процесс образования скважины.

Результаты. В результате экспериментальных исследований доказана гипотеза о возможности осуществления процесса бурения деформацией отрыва и получения скважины диаметром больше диаметра разрушающего участка винтовой лопасти. Установлена зависимость объема разрушаемого грунта и отношения диаметра полученной скважины к диаметру разрушающей части винтовой лопасти от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение.

Заключение. Установлено, что винтовой буровой инструмент осуществляет бурение скважины за счет реализации деформации отрыва, что позволяет достигать более эффективного бурения и получать диаметр скважины большего размера, чем диаметр разрушающего участка винтовой лопасти.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: винтовой рабочий орган, мерзлый грунт, бурение мерзлого грунта, винтовая лопасть, откол грунта, внедрение лопасти, разрушающая часть, буровой инструмент.

Поступила 12.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 162-171. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

© Мартюченко И.Г., Зенин М.И.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

INTERACTION OF A HELICAL BLADE OF A DRILLING TOOL WITH FROZEN GROUND

Igor G. Martiuchenko, Maksim I. Zenin

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Saratov State Technical university named after Y.A. Gagarin»,
Saratov, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Drilling of frozen and permafrost soils is one of the most complicated and energy-intensive processes of earthworks. The current drilling tools are not efficient enough to use since they implement energy-intensive drilling processes and are not always suitable for various types of soil. The use of helical working elements that implement the process of soil destruction with less energy-intensive types of deformations is advanced. The purpose of the research is to study the interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen soil.

Materials and methods. The article covers a method for conducting experimental studies of the interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen ground and the tested models of the drilling tool. The influence of geometric parameters of a helical drill on a borehole formation process is studied.

Results. The experimental research proved the hypothesis about the possibility of implementing a drilling process with tearing strain and obtaining a borehole diameter larger than a diameter of a destructive section of a helical blade. The dependence of the destroyed soil volume and the relation of an obtained borehole diameter to a diameter of a destroying section of a helical blade according to the angle of bend of a helical blade radius at which its increment occurs is determined.

Discussions and conclusion. It is established that a helical drilling tool performs a borehole drilling due to the tearing strain implementation, which makes it possible to achieve more efficient drilling and obtain a borehole diameter larger than a diameter of the destroying section of a helical blade.

KEYWORDS: helical working element, frozen ground, frozen ground drilling, helical blade, soil spalling, blade punching, destroying section, drilling tool.

Submitted 12.02.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Martiuchenko I.G., Zenin M.I. Interaction of a helical blade of a drilling tool with a frozen ground. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 162-171. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

© Martiuchenko I. G., Zenin M. I.



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

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция развития способов бурения мерзлых грунтов обуславливается постоянным созданием новых или совершенствованием существующих буровых инструментов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Причиной этого является достаточно сложная структура мерзлых грунтов, которые характеризуются особенностью физико-механических свойств – высокой прочностью и абразивностью.

Существующие буровые инструменты, которые используются на мерзлых грунтах, например лопастные, шарошечные или режуще-шарошечные, не всегда способны эффективно работать на тех или иных категориях грунтов. Ввиду несоответствия реализуемых ими видов деформации, при которых происходит разрушение грунта в стволе образуемой скважины [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Более эффективные способы разрушения грунта при бурении скважины реализуют винтовые рабочие органы, представленные в патентах №1710689, №49844, №1254123 [23]. При контакте с грунтом такой тип буровых инструментов реализует менее энергоемкие процессы бурения мерзлых грунтов за счет реализации деформации сдвига.

Похожий характер разрушения грунта осуществляет винтовой бур по заявке на патент №2019114496 (рисунок 1). При использовании данного типа бурового инструмента и за счет хрупкого разрушения мерзлого грунта происходят деформации отрыва и сдвига. Такой процесс обеспечивает бурение при меньших энергозатратах по сравнению с другими видами существующих буровых инструментов [24].

Предлагаемый винтовой бур состоит из заходной и разрушающей частей (см. рисунок 1). Заходная часть обеспечивает тяговое усилие, необходимое для работы бурового инструмента без задавливающей нагрузки, и состоит из конического сердечника с размещенной на нем винтовой лопасти переменного радиуса и постоянного шага. Разрушающая часть содержит винтовую лопасть с переменными геометрическими параметрами. На первом участке лопасть имеет постоянный шаг и переменный радиус, изменяющийся при повороте радиуса на определенный угол (ψ), на втором участке винтовая лопасть имеет постоянный радиус и увеличивающийся шаг, при этом изменяется наклон верхней образующей поверхности винтовой лопасти к оси вращения – от острого до прямого угла [25].

При приращении радиуса винтовой лопасти происходит ее внедрение в грунт в радиальном направлении, что приводит к сколу грунта в сторону открытой поверхности, а приращение шага винтовой лопасти обеспечивает окончательное формирование ствола скважины диаметром большим, чем диаметр первого скалывающего участка винтовой лопасти.

На данный момент рассматриваемый процесс взаимодействия винтовой лопасти с мерзлым грунтом для образования скважины не изучен и требует должных исследований для обеспечения полноценной работы винтового бора.

При изучении процесса разрушения мерзлого грунта винтовым буром основными задачами экспериментальных исследований являлись:

- доказать выдвинутую гипотезу об осуществлении процесса бурения сколом и отрывом грунта;
- определить влияние скорости внедрения винтовой лопасти с изменяющимся радиусом на объем откалываемого грунта;
- определить влияние скорости на отношение диаметра образованной скважины к диаметру винтовой лопасти на разрушающей части.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях. Учитывая, что физико-механические свойства мерзлого грунта оказывают значительное влияние на механизм процесса разрушения, особое внимание было уделено выбору и подготовке грунта для экспериментальных исследований. Для лабораторных экспериментов было выбрано три типа грунтов: песок, супесь, суглинок.

Температура грунта в большинстве опытов была от -4°C до -7°C . Влажность при этом составляла в среднем: для песка – 15%, для супеси – 18%, для суглинка – 20%.

Для получения равномерной плотности грунта производилось послойное уплотнение, режим уплотнения подбирался опытным путем. Для того чтобы достичь наибольшего сцепления слоев, производилось разрыхление верхней поверхности слоя на глубину 5–15 мм.

Для достижения массивной криогенной текстуры грунт в форме замораживался в холодильной камере при температуре -22°C и выдерживался не менее 48 ч при заданной температуре.

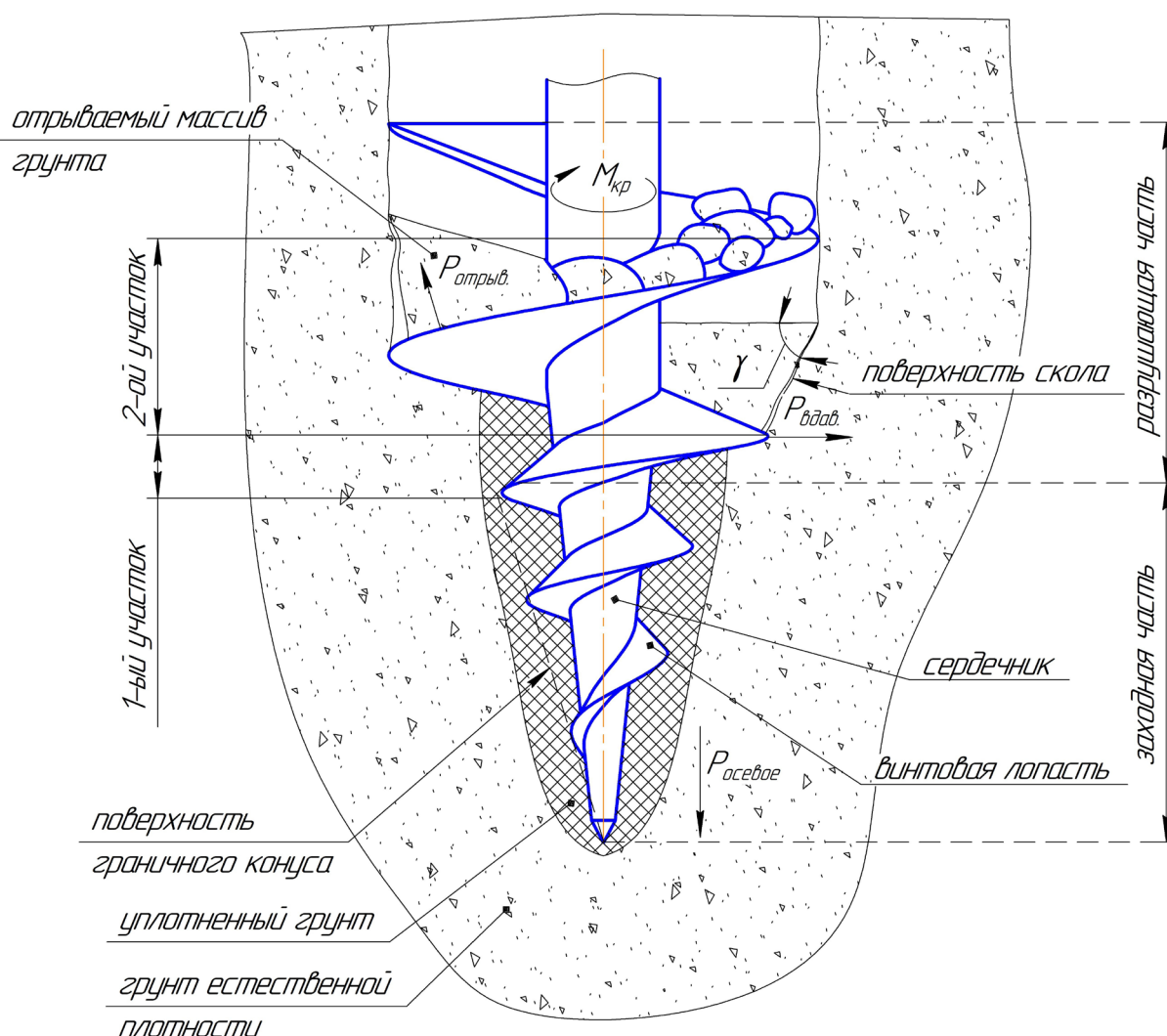


Рисунок 1 – Схема взаимодействия винтового бура с грунтом:

 γ — угол образования трещины

Figure 1 – Scheme of the interaction of a screw drill with soil:

 γ — a crack angle

Прочность подготовленных образцов грунта определялась по числу ударов С плотнометра ДОРНИИ.

Экспериментальные исследования проводились с использованием масштабных моделей винтовых буров. Размер моделей определялся по методике моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин профессора В.И. Баловнева [26].

Модель бурового инструмента представляла собой сердечник с цилиндрической и конической частями и с размещенной на них винтовой лопастью. Варьируемым геометрическим параметром являлся угол поворота радиуса винтовой лопасти ψ , при котором радиус изменяет свое значение от максимального радиуса винтовой лопасти на заходной части $r_{\text{зак}}$ до максимального радиуса винтовой лопасти на первом участке $r_{\text{1уч}}$ (рисунок 2).

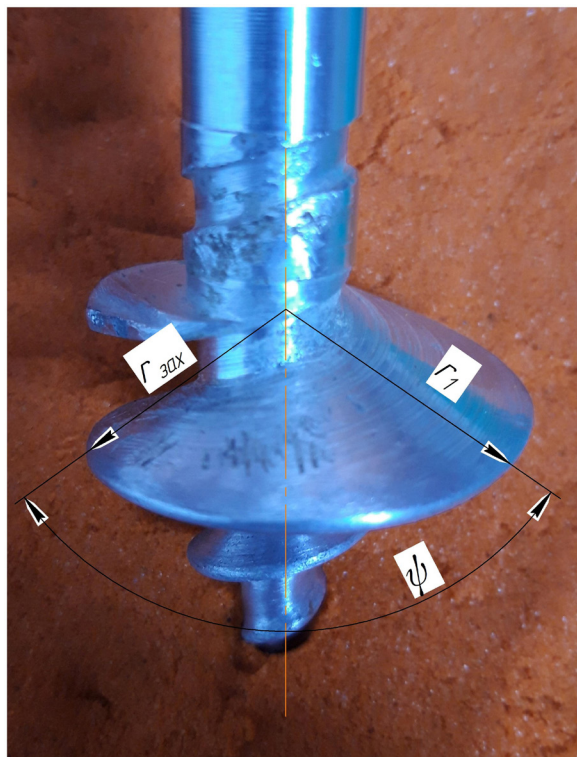


Рисунок 2 – Модель винтового бура с исследуемым геометрическим параметром:
 Ψ – угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части

Figure 2 – A model of a helical drill with a tested geometric parameter:

Ψ – the angle of bend of a radius of a helical blade, at which an increment on the destroying section occurs

Для проверки влияния скорости внедрения винтовой лопасти в грунт на характер его разрушения было исследовано 5 моделей винтовых буров с разными углами поворота радиуса, при которых происходит его приращение на разрушающей части винтовой лопасти: 45° , 90° , 180° , 270° , 360° (рисунок 3).

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, на котором обеспечивалось равномерные вращательное и осевое поступательные движения винтового бура. Так как заходная часть винтового инструмента исследована ранее и для нее определена эффективная частота вращения, равная 50 об/мин, то и для всего винтового бура была принята та же частота вращения [18]. Для начального задавливания модели бурового инструмента в грунт была принята скорость погружения, соответствующая погружению бура за один оборот на величину шага винтовой лопасти. Экспериментальные исследования включали проведения серии экспериментов с трехкратным повторением.

В ходе экспериментов изучалась картина разрушения грунта в образуемой скважине винтовой лопастью переменного радиуса на цилиндрическом участке винтового бура. Для этого использовались разъемные формы, позволяющие разделять грунт по оси скважины. Картина разрушения грунта винтовой лопастью бура представлена на рисунке 4.



Рисунок 3 – Исследуемые модели винтовых буров

Figure 3 – The tested models of helical drills

Процесс разрушения грунта винтовой лопастью происходит в две стадии. Первая стадия – внедрение винтовой лопасти сопровождается образованием уплотнённой зоны вокруг винтовой поверхности разрушающей части лопасти за счет действия сил сжатия грунта. При этом разрушение грунта не наблюдалось. Далее лопасть продолжает поворачиваться, внедряясь в грунт, и протекает вторая стадия. На второй стадии грунт продолжает сжиматься и достигает предельного состояния, при котором происходит образование трещин под углом γ . Вслед за этим протекает отрыв грунта под действием результирующей силы, возникающей на верхней поверхности (см. рисунок 4).



Рисунок 4 – Процесс отрыва грунта разрушающей частью винтовой лопастью винтового бура

Figure 4 – The process of soil removing by the destroying section of a helical blade of a helical drill

На рисунке 4 видно, что грунт разрушается под действием винтовой лопасти диаметром d_1 , и при этом трещина идет под углом γ , что приводит к образованию скважины с большим диаметром d_2 . Данный процесс наблюдается при наличии разрушенного грунта над разрушающей лопастью на определенном расстоянии от нее по всей цилиндрической поверхности ствола скважины диаметром d_2 .

Таким образом, для достижения данного эффекта необходимо применения второго участка винтовой лопасти диаметром d_2 с увеличивающимся шагом, который будет формировать поверхность, свободную от неразрушенного грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментальных исследований была доказана выдвинутая гипотеза о влиянии приращения радиуса винтовой лопасти на первом участке разрушающей части винтовой лопасти на физический процесс разрушения мерзлого грунта. Также было установлено, что возможно получить диаметр скважины (d_2) больше, чем диаметр (d_1) винтовой лопасти на разрушающей части.

При проведении опытов была определена зависимость объема отрываемого грунта разрушающей частью винтовой лопастью за один ее оборот.

Зависимость объема отрываемого грунта и отношения диаметра полученной скважины к диаметру разрушающей части винтовой лопасти от угла поворота ее радиуса, при котором происходит приращение радиуса, представлена на рисунке 5.

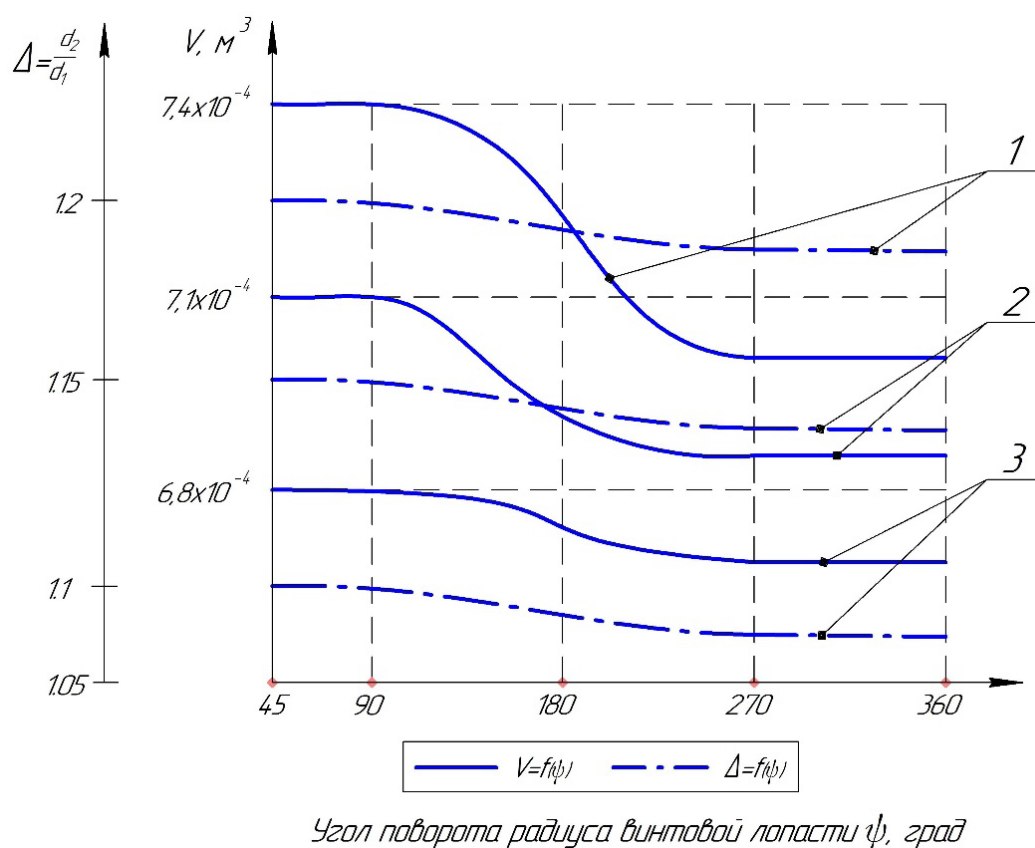


Рисунок 5 – Зависимость объема отрываемого грунта и отношения диаметра полученной скважины к диаметру винтовой лопасти разрушающей части от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит

приращение радиуса винтовой лопасти: 1 – песок, 2 – супесь, 3 – суглинок; $\Delta = d_2/d_1$ – отношение диаметра полученной скважины к диаметру винтовой лопасти разрушающей части, V – объем разрушаемого грунта

Figure 5 – The dependence of the destroyed soil volume and the relation of an obtained borehole diameter to a diameter of a destroying section of a helical blade according to the angle of bend of a helical blade radius at which its increment occurs:

1 – sand, 2 – sandy loam, 3 – loam; $\Delta = d_2/d_1$ – the relation of an obtained borehole diameter to a diameter of a destroying section, V – a volume of destructible soil

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что для всех типов грунтов важным фактором является угол поворота, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти, этот параметр влияет на скорость внедрения разрушающего участка винтовой лопасти в грунт.

Установлено, что с увеличением угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение, наблюдается уменьшение объема отрываемого грунта и величины отношения диаметра полученной скважины к диаметру винтовой лопасти раз-

рушающей часть в диапазоне значений от 90° до 270°. Большой эффект этих показателей проявляется при значениях угла ψ до 90° (см. рисунок 5).

Наибольшая эффективность исследуемого винтового бура проявляется на мерзлых грунтах, обладающих в большей степени хрупкими свойствами – песчаных и супесчаных. Это представляет наибольшее значение, т.к. именно эти грунты вызывают большие трудности при их бурении из-за высокой прочности и абразивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый буровой инструмент осуществляет процесс бурения за счет деформаций отрыва и сдвига грунта. Такой характер деформации грунта является менее энергоемким и наиболее эффективным процессом по сравнению с деформациями грунта, которые осуществляют другие существующие буровые инструменты. Это имеет огромное значение для процесса бурения мерзлого грунта. Использование винтового бурового инструмента позволит осуществлять процесс бурения мерзлых грунтов с меньшими энергозатратами, по сравнению с существующими видами буровых инструментов, и большей эффективностью.

Проведенные экспериментальные исследования показали необходимость и целесообразность проведения дальнейших исследований, направленных на определение рациональных геометрических параметров и режимов рабочего процесса, способствующих достижению наибольшей эффективности бурения скважин в мерзлых грунтах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lev V.E., Lev V.E., Izzy M.K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019. vol. 38.
2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017. pp. 23–52.
3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. vol. 120. pp. 138–144.
4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012. vol. 81, no. 2. pp. 151–153.
5. Arenson L.U., Springman S.M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 °C // *Canadian Geotechnical Journal*. 2005. T. 42. №. 2. pp. 431–442.
6. Герасимов Д.С. и др. О влиянии режима нагружения на механические свойства мерзлых грунтов // *Наземные транспортно-технологические комплексы и средства*. 2016. С. 73–77.
7. Yang Z.J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015. vol. 113. pp. 12–19.
8. Aksenov V.I., Kal'bergenov R.G., Leonov A.R. Strength characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 40: 55–59.
9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil // *Cold regions science and technology*. 2010. T. 64. №. 1. pp. 39–45.
10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. T. 113. pp. 81–90.
11. Тимофеев Н.Г., Жирков А.Н. Концепция разработки инновационного породоразрушающего инструмента для бурения скважин в условиях криолитозоны // *Евразийский союз ученых*. 2015. №4. С. 151–154.
12. Talalay P.G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore. 2016. pp. 1–8.
13. Ивкин В.С., Алашеев М.О. Влияние физико-механических свойств грунтов на работу машин для земляных работ // *Вестник УлГТУ*. 2015. №3. С.62–67.
14. Ивкин В.С., Вунберова Н.П. Малообъемные, рассредоточенные зимние земляные работы в стесненных условиях строительства // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2018. №2. С. 52–55.
15. Валигура Н.С. Способы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №2. С. 27–30.
16. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of cold regions*. 2016. no. 123. pp. 107–113.
17. Черкасов В.И. Области применения и проблемы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №2. С. 24–27.
18. Валигура Н.С. Породоразрушающие инструменты для вращательного бурения неглубоких скважин и их основные конструктивные особенности // *Разведка и охрана недр*. 2014. №2. С. 30–33.
19. Саленко А.Ф., Федотьев А.Н., Федотьев Н.А. Перспективы использования регенерированного твердого сплава для производства буровых долот // *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. 2014. №150. С. 139–145.
20. Гилев А.В., Бовик К.А., Шигин А.О., Белозеров И.Р. Анализ проходки шарошечных долот в условиях Олимпиадинского ГОКа ЗАО «ПОЛЮС» // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. №2. С. 153–153.
21. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2013. no.12. pp. 12–26.
22. Бугаев В.Г., Ереско С.П., Бугаев И.В. Выбор и обоснование конструктивных параметров бурового режущего инструмента для проходки скважин в мерзлых грунтах // *Горное оборудование и электромеханика*. 2013. №2. С. 6–13.
23. Мартюченко И.Г. Винтовые рабочие органы машин для разработки мерзлых грунтов / И.Г. Мартюченко.: монография. М.: Научная мысль. ИН-ФА-М, 2014. 200 с.
24. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Перспективы развития бурового инструмента для вечномерзлых грунтов // *Строительные и дорожные машины*. 2019. №9. С.47–48.
25. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Состояние и перспективы развития бурового инструмента для

мерзлых грунтов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 1(34).

26. Баловнев В.И. и др. Определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований // Строительные и дорожные машины. 2019. №12. С. 3–11.

REFERENCES

1. Lev V.E., Lev V.E., Izzy M.K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019; vol. 38: 1–9.

2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017: 23–52.

3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; 120: 138–144.

4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012; 81, no. 2: 151–153.

5. Arenson L.U., Springman S.M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005; 42, no. 2: 431–442.

6. Gerasimov D.S. O vlijanii rezhima nagruzheniya na mehanicheskie svoystva merzlyh gruntov [About the influence of the loading regime on the mechanical properties of frozen soils]. *Nazemnye transportno-technologicheskie komplekсы i sredstva*. 2016: 73–77. (in Russian).

7. Yang Z.J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015; 113: 12–19.

8. Aksenov V.I., Kal'bergenov R.G., Leonov A.R. Strength characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 40: 55–59.

9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil. *Cold regions science and technology*. 2010; 64, no. 1: 39–45.

10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils. *Cold regions science and technology*. 2015; 113: 81–90.

11. Timofeev N.G., Zhirkov A.N. Konceptiya razrabotki innovacionnogo porodorazrushajushhego instrumenta dlja burenija skvazhin v uslovijah kriolitozony [The concept of developing an innovative rock cutting tool for borehole drilling in cryolithozone conditions]. *Evrazijskij sojuz uchenyh*. 2015; 4: 15–154. (in Russian).

12. Talalay P.G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore. 2016: 1–8.

13. Ivkin V.S., Alasheev M.O. Vlijanie fiziko-mechanicheskikh svoystv gruntov na rabotu mashin dlja zemljanyh rabot [The influence of physical and mechanical properties of soils on the work of machines for earthworks]. *Vestnik UIGTU*. 2015; 3: 62–67. (in Russian).

14. Ivkin V.S., Vunberova N.P. Maloob'jomnye, rassredotochennye zimnie zemljanye raboty v stesnjonyh uslovijah stroitel'stva [Low volumed dispersed winter earthworks in cramped construction conditions]. *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018; 2: 52–55. (in Russian).

15. Valigura N.S. Sposoby burenija neglubokih skvazhin [Methods of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2014; no. 2: 27–30.

16. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of cold regions*. 2016; 123: 107–113.

17. Cherkasov V.I. Oblasti primeneniya i problemy burenija neglubokih skvazhin [Fields of application and issues of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2014; 2: 24–27. (in Russian).

18. Valigura N. S. Porodorazrushajushhie instrumenty dlja vrashatel'nogo burenija neglubokih skvazhin i ih osnovnye konstruktivnye osobennosti [Rock-Breaking tools for rotational drilling of shallow wells and their main design features]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2014; 2: 30–33. (in Russian).

19. Salenko A.F., Fedotiev A.N., Fedotiev N.A. Perspektivy ispol'zovanie regenerirovannogo tverdogo splava dlja proizvodstva burovых dolot [The prospects for the use of regenerated hard alloy for the production of drill bits]. *Visnik SevNTU. Serija: Mashinopriladobuduvannja ta transport*. 2014; 150: 139–145. (in Russian).

20. Gilev A.V., Bovik K.A., Shigin A.O., Belozero I.R. Analysis of rolling cone chisels in the conditions of the Olympiadinsky GOK CJSC POLYUS. *Modern problems of science and education*. 2015; 2: 153–153.

21. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2013; 12: 12–26.

22. Bugaev V.G., Eresko S.P., Bugaev I.V. Vybor i obosnovanie konstruktivnyh parametrov burovogo rezhushhego instrumenta dlja prohodki skvazhin v merzlyh gruntah [The selection and substantiation of design parameters of a drilling cutting tool for drilling holes in frozen soils]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2013; 2: 6–13. (in Russian).

23. Martyuchenko I.G. Vintovye rabochie organy mashin dlja razrabotki merzlyh gruntov [The helical working elements of machines for the frozen soils ecavation]. Moscow. INFA-M, 2014: 200p.

24. Martyuchenko I.G., Zenin M.I. Perspektivy razvitiya burovogo instrumenta dlja vechnomerzlyh gruntov [The perspectives for the development of drilling tools for permafrost soils]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 9: 47–48. (in Russian).

25. Martyuchenko I.G., Zenin M.I. Sostojanie i perspektivy razvitiya burovogo instrumenta dlja merzlyh gruntov [Conditions and perspectives of development of drilling tools for frozen soils]. *Tehničeskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2019; 34. (in Russian).

26. Balovnev V.I. *Opreделение optimal'nyh parametrov transportno-tehnologicheskikh mashin metodami teorii podobnykh preobrazovaniy* [Determination of optimal parameters of transport and technological machines by methods of the theory of similar transformations]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 12: 3–11. (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Мартюченко Игорь Гаврилович – Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения алгоритма экспериментальных исследований (50%).

Зенин Максим Иванович – Проведение экспериментальных исследований взаимодействия моделей винтового бура с мерзлым грунтом, анализ полученных результатов, выполнение обзора литературных источников (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Igor G. Martiuchenko – Formation of the research problem, statement of the research tasks, designation of the experimental research algorithm (50%).

Maksim I. Zenin – Conducting experimental studies of the interaction of screw drill models with frozen soil, analysis of the results, a review of literary sources. (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мартюченко Игорь Гаврилович (г. Саратов) – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина» (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 e-mail: sdm-sstu@rambler.ru).

Зенин Максим Иванович (г. Саратов) – ассистент кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина» (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 e-mail: sdm-sstu@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor G. Martiuchenko (Saratov, Russia) – Dr. of Tech. Sci., Professor, the Department of Transport Construction, "Saratov State Technical university named after Y.A. Gagarin" (410054, Saratov, Polytechnicheskaya Street, 77 e-mail: sdm-sstu@rambler.ru).

Maksim I. Zenin (Saratov, Russia) – Assistant, the Department of Transport Construction, "Saratov State Technical university named after Y.A. Gagarin" (410054, Saratov, Polytechnic, 77 e-mail: zenin-1995@mail.ru).

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРОМКИ ЛЕЗВИЯ КОНСОЛЬНОГО НОЖА С ГРУНТОМ

В.А. Николаев*ФГБОУ ВО «Ярославский технический университет»,
г. Ярославль, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Основными рабочими органами агрегата являются ковши. Лезвие консольного ножа, установленного на ковше, подрезает верхний слой грунта снизу. Оно расположено под углом 45° к направлению перемещения ковша, имеет угол заточки. Передний угол лезвия консольного ножа.

Методика исследования. Консольный нож разделен на элементы: кромку лезвия, верхнюю фаску лезвия, поверхность консольного ножа, нижнюю плоскость. Заменено последовательное воздействие на грунт многих консольных ножей в пределах ширины захвата агрегата воздействием на грунт одного условного консольного ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного консольного ножа с грунтом названы условными силами. Приведена методика расчёта затрат энергии при внедрении кромки лезвия консольного ножа в грунт: на отделение пласта от массива грунта, на создание щели в массиве грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа. Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии.

Результаты. На основе разработанной методики расчёта выявлено расстояние, на которое должен переместиться консольный нож для разработки одного кубического метра грунта, и время этого перемещения. Рассчитаны затраты энергии при внедрении кромки лезвия консольного ножа в грунт: на отделение пласта от массива грунта, на создание щели в массиве грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа. Определены общие затраты энергии и их структура при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр.

Заключение. Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр около 7 тыс. Дж/куб.м. В структуре затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом преобладают затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия. Для определения общих затрат энергии на резание грунта консольными ножами ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов консольных ножей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильная дорога, агрегат непрерывного действия, грунт, консольный нож, затраты энергии.

Поступила 12.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

ANALYSIS OF INTERACTION OF A CANTILEVER KNIFE BLADE WITH SOIL

Vladimir A. Nikolaev

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Yaroslavl State Technical University”,
Yaroslavl, Russia*

ABSTRACT

Introduction. In order for the road to be durable at the minimum necessary cost for its construction, the topsoil should be carefully removed without disturbing the soil located under the topsoil. The problem of cheapening the roads construction without reducing their quality can be solved by creating a continuous unit for the formation of the underlying layer. The main working elements of the unit are shovels. The blade of the cantilever knife fixed on the shovel cuts the topsoil from the bottom. It is located at the angle of 45° to the direction of movement of the shovel and also has a sharpening angle. The front angle of the blade of the cantilever knife.

The method of research. The cantilever knife is divided into the elements: the edge of the blade, the upper face of the blade, the surface of the cantilever knife, a lower plane. The consecutive impact of many cantilever knives on the ground within the operating unit width with the ground of one notional cantilever knife at a distance necessary for the excavation of one cubic meter of soil was replaced. The interacting forces of a notional cantilever knife with soil are called notional forces. The methodology of calculating energy costs when penetrating the edge of the blade of the cantilever knife into the soil is presented: to separate a layer from the body of the soil, to create a gap in the body of the soil, to overcome the friction of the soil against the edge of a blade of a cantilever knife. The total energy consumption during the interaction of a edge of a blade of a cantilever knife in the soil excavation with a volume of one cubic meter was obtained by adding the particular energy consumption.

Results. Based on the developed calculation method, the distance at which a cantilever knife has to move to excavate one cubic meter of soil, and the time of this movement determined. The energy costs are calculated when penetrating the edge of the blade of the cantilever knife into the soil: to separate a layer from the body of soil, to create a gap in the body of soil, to overcome the friction of the soil against the edge of a blade of a cantilever knife. The total energy consumption and their structure during the interaction of the edge of a blade of a cantilever knife with the soil during the soil excavation with a volume of one cubic meter are determined.

Conclusion. The total energy consumption during the interaction of an edge of a blade of a cantilever knife with the soil during the development of soil with a volume of one cubic meter is about 7 thousand J/cubic meter. In the energy costs structure during the interaction of an edge of a blade of a cantilever knife with the soil, energy costs prevail to overcome the friction of the soil against an edge of a blade. To determine the total energy consumption for cutting soil with cantilever knives shovels of the unit for removing the upper soil layer from the underlying layer of a road, it is necessary to analyze the interaction of other elements of cantilever knives with the soil.

KEYWORDS: road, continuous action unit, soil, cantilever knife, energy costs.

Submitted 13.02.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev V.A. Analysis of interaction of a cantilever knife blade with soil. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (2): 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

© Nikolaev V.A.



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

Основные положения:

- 1) определены затраты энергии: на отделение пласта от массива грунта, создание щели в массиве грунта, преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа;
- 2) определены общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом в период разработки грунта объёмом один кубический метр;
- 3) выявлена структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом.

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя¹ [1]. Основными рабочими органами агрегата являются ковши, которые отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижнее лезвие отрезает слой грунта снизу, правое лезвие – сбоку, а лезвие консольного ножа частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. Геометрические параметры ковша получены из конструктивной компоновки агрегата [1].

Консольный нож (рисунок 1) является лег-

косъёмным. Полку консольного ножа вставляют внутрь корпуса ковша и фиксируют прижимом нижнего ножа [1]. Консольный нож осуществляет зажатое резание, так как слой почвы над ним весьма значительный. Чтобы резание грунта происходило с малыми затратами энергии, передний угол лезвия консольного ножа в продольно-вертикальной плоскости, соответствующей направлению движения агрегата, должен быть меньше угла трения стали о грунт: $\varphi_{с-г} \approx 26^\circ$. Примем передний угол лезвия консольного ножа $\alpha = 25^\circ < \varphi_{с-г}$. Так как лезвие расположено под углом 45° к направлению перемещения ковша, происходит резание грунта со скольжением. При этом угол заострения лезвия консольного ножа в продольно-вертикальной плоскости, то есть в направлении движения агрегата, будет значительно меньше угла его заточки, измеренного в вертикальной плоскости, перпендикулярной лезвию. Это называют трансформацией угла заострения. В связи с трансформацией угла заострения для повышения прочности лезвия консольного ножа угол заточки лезвия увеличим до $i = 31,8^\circ$.

Теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены^{2,3} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24], однако представляет теоретический и практический интерес анализ резания грунта консольным ножом ковша агрегата непрерывного действия.

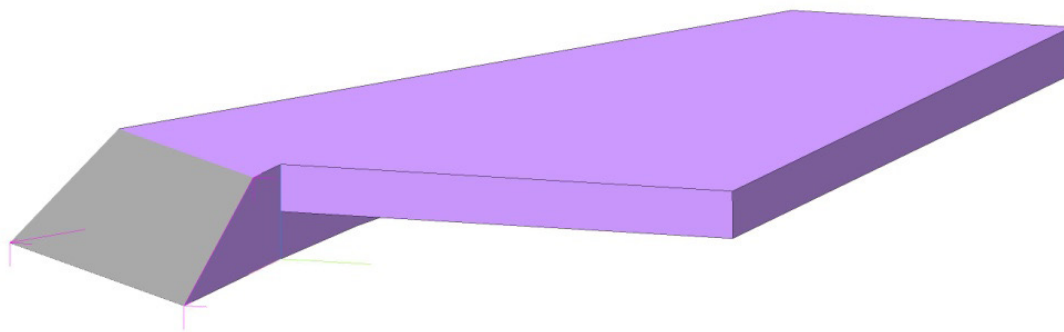


Рисунок 1 – Консольный нож

Figure 1 – Cantilever knife

¹ Патент №2689007 РФ. Агрегат для удаления почвы с подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев, И.С. Тюремов. №2018122727; заявл. 21.06.2018; опубл. 23.05.2019, бюл. №15. 11 с.

² Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. М.: «Машиностроение», 1989. С. 145–153.

³ Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разделим консольный нож на элементы: кромку лезвия, верхнюю фаску лезвия, поверхность консольного ножа, нижнюю плоскость и проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Существуют два способа определения затрат энергии на перемещение рабочего органа в грунте [24]. Первый способ заключается в определении среднего значения результирующей силы сопротивления грунта перемещению рабочего органа с последующим умножением на его путь в грунте или другом обрабатываемом материале. Для выявления среднего значения результирующей силы сопротивления грунта определяют средние значения сил взаимодействия каждого элемента с грунтом. Этот способ удобен там, где есть возможность с достаточной степенью точности определить массу грунта, воздействующую на элемент рабочего органа. Однако не всегда удаётся определить с достаточной степенью точности массу грунта, воздействующую на элемент рабочего органа, а также и некоторые действующие силы.

Сущность второго способа состоит в выявлении условных сил и затрат энергии при разработке одного кубического метра грунта. При определении условных сил взаимодействия элементов рабочего органа с грунтом широко используют моделирование в пространстве и плоскости. Установлено [24], что резание грунта лезвием происходит микроотрывами. Поэтому для определения мгновенных значений сил выявленные условные силы приводят к расстоянию одного микроотрыва. Для определения затрат энергии при взаимодействии с грунтом кромки лезвия консольного ножа целесообразно использовать второй способ. Заменяем последовательное воздействие на грунт многих консольных ножей в пределах ширины захвата агрегата воздействием на грунт одного условного консольного ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного консольного ножа с грунтом назовём условными силами.

Чтобы определить условные силы при разработке одного кубического метра грунта, приложенные к кромке лезвия консольного ножа, следует выявить составляющие затрат энергии на резание. При внедрении кромки лезвия консольного ножа в грунт существуют затраты энергии:

- на отделение пласта от массива грунта;
- на создание щели в массиве грунта;

- на деформацию части массива грунта;
- на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа.

Энергия, необходимая для отделения пласта грунта от его массива кромкой лезвия консольного ножа

Кромка лезвия консольного ножа, врезаясь в грунт, отделяет пласт грунта от его массива. Ширина захвата лезвия консольного ножа b_k , максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{сл}$ и скорость цепей v_c известны [1]. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние

$$s_k = \frac{1}{b_k h_{сл}}. \quad (1)$$

Так как скорость ковша равна скорости цепей $v_k = v_c$, то время перемещения ковша на расстояние s_k :

$$\tau_k = \frac{s_k}{v_k}. \quad (2)$$

Заменяем дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 грунта. Ширина отрыва пласта от массива грунта равна ширине захвата консольного ножа b_k . Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна s_k . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$S_{отркнс} = b_k s_k. \quad (3)$$

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Примем для зажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение σ_p^B . Условная сила воздействия кромки лезвия одного условного консольного ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта объёмом один кубический метр,

$$F_{отркнс} = \sigma_p^B S_{отркнс}. \quad (4)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{отр}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом воздействием кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{отркнс} = F_{отркнс} h_{отр}. \quad (5)$$

Энергия на создание щели в массиве грунта

На рисунке 2, а показана схема образования щели в массиве грунта от воздействия на него консольного ножа.

При его перемещении в массиве грунта образуется щель. Щель в массиве создаёт не только кромка лезвия консольного ножа, но и его фаска. Отнесём затраты энергии на создание щели в массиве грунта только на кромку лезвия консольного ножа. Примем ширину щели в массиве равной среднестатистической длине микроотрыва [24] $b_{щ} = l_{отр}$. Заменим дискретный разрыв массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу разорван массив и в грунте образовалась щель площадью, равной площади разрыва массива при разработке 1 м³ грунта. Общая длина щели в массиве грунта объёмом один кубический метр $l_{щконс} = s_k$. Площадь щели в массиве грунта от воздействия кромки лезвия консольного ножа

$$S_{щконс} = b_{щ} l_{щконс} \quad (6)$$

Условная сила, необходимая для создания щели в массиве грунта воздействием кромки лезвия консольного ножа

$$F_{щконс} = \sigma_p^B S_{щконс} \quad (7)$$

Примем величину перемещения грунта при создании щели в массиве $h_{щ}$. Энергия на создание щели в массиве при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{щконс} = F_{щконс} h_{щ} \quad (8)$$

Затраты энергии на деформацию части массива грунта

Консольный нож при перемещении создаст в массиве грунта напряжения сдвига по линии АВ (рисунок 2, б), направленной к вертикали под углом трения грунта о грунт [24]. Из рисунка ширина площади сдвига грунта была бы $l_{AB} = 353,5$ мм, величина сдвига $s_{сдконс} = 4$ мм (см. рисунок 2, а). Так как толщина консольного ножа небольшая, реального сдвига грунта не произойдёт, а произойдёт лишь накопление в грунте упругого потенциала. Рассчитать затраты энергии на накопление упругого потенциала сложно, поэтому затратами энергии на деформацию части массива грунта пренебрегаем. Их можно учесть в расчёте общих затрат энергии на перемещение консольного ножа поправочным коэффициентом.

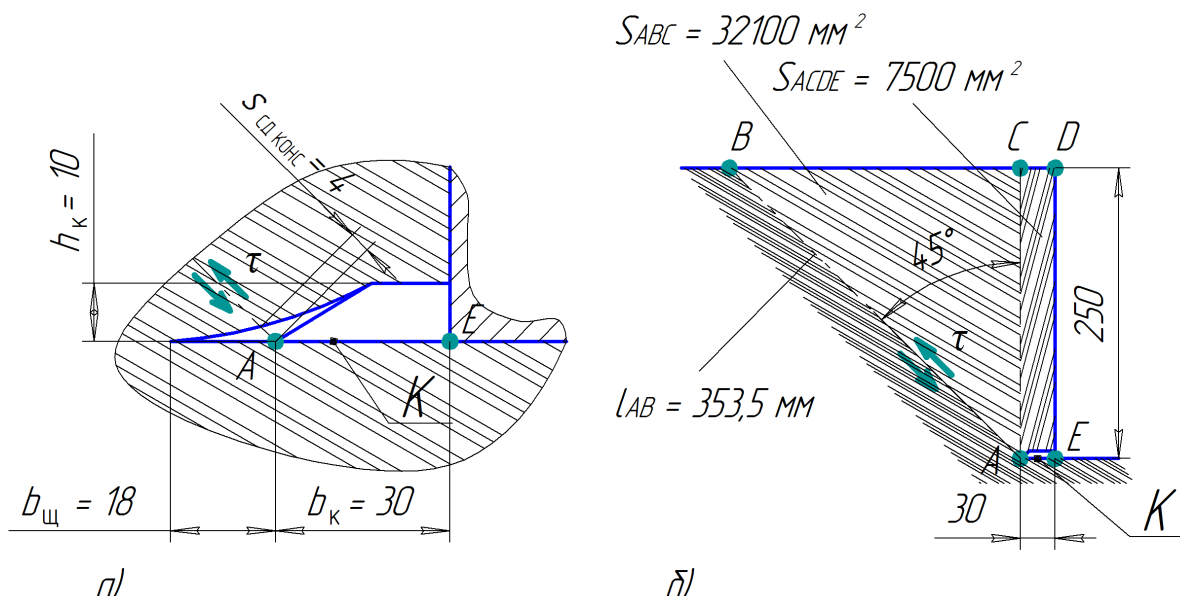


Рисунок 2 – Схема: а – образование щели в массиве грунта от воздействия на него консольного ножа «К»; б – появление касательных напряжений сдвига в массиве грунта, на который воздействует консольный нож

Figure 2 – Scheme: a – formation of a gap in the soil mass from exposure to him console knife «K»; b – the appearance of shear stresses in the soil mass, which is affected by the cantilever knife

Затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа, общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом

Выявленные условные силы $F_{отркнс}$ и $F_{щкнс}$ являются распределёнными. Заменяем их на сосредоточенные силы, приложенные к середине кромки лезвия консольного ножа. Эти условные силы лежат в плоскости, перпендикулярной передней поверхности, то есть верхней фаске лезвия консольного ножа. Составим пространственную схему условных сил (рисунок 3).

К силе $F_{отркнс}$ прибавим силу $F_{щкнс}$, получим условную нормальную реакцию кромки лезвия консольного ножа на воздействие грунта. Спроецировав её на продольно-вертикальную плоскость, получим проекцию условной нормальной реакции кромки лезвия консольного ножа $N_{\Sigma ккнс}$.

Нанесём оси (тонкие стрелки). Направим ось x в сторону перемещения ковша, горизонтальную ось y перпендикулярно перемещению ковша, а ось z – вверх. Спроецировав сумму условных сил $F_{отркнс}$ и $F_{щкнс}$ на оси, определим величины её проекций, которые могут потребоваться для расчётов: $F_{кх}$, $F_{кy}$, $F_{кz}$ и соотношения этих проекций к сумме условных сил $F_{отркнс}$ и $F_{щкнс}$. Из пространственной схемы

сил: проекция, направленная в сторону перемещения ковша, $F_{кх} = 0,389(F_{отркнс} + F_{щкнс})$; горизонтальная проекция, направленная перпендикулярно перемещению ковша $F_{кy} = 0,389(F_{отркнс} + F_{щкнс})$; вертикальная проекция – $F_{кz} = 0,834(F_{отркнс} + F_{щкнс})$.

Условная сила трения направлена в сторону перемещения ковша, параллельно оси x :

$$F_{\Sigma ткнкнс} = f_{с-г} N_{\Sigma ккнс}. \quad (9)$$

Путь консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр s_k . Нормальную силу $N_{\Sigma крпр}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{отр}$, используя пропорцию: $\frac{N_{ккнс}}{N_{\Sigma ккнс}} = \frac{l_{отр}}{s_k}$. Откуда

$$N_{ккнс} = N_{\Sigma ккнс} \frac{l_{отр}}{s_k}. \quad (10)$$

Сила трения кромки лезвия консольного ножа о грунт

$$F_{ткрнкнс} = f_{с-г} N_{ккнс}. \quad (11)$$

Энергия на преодоление трения о кромку лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{ткрнкнс} = F_{ткрнкнс} s_k. \quad (12)$$

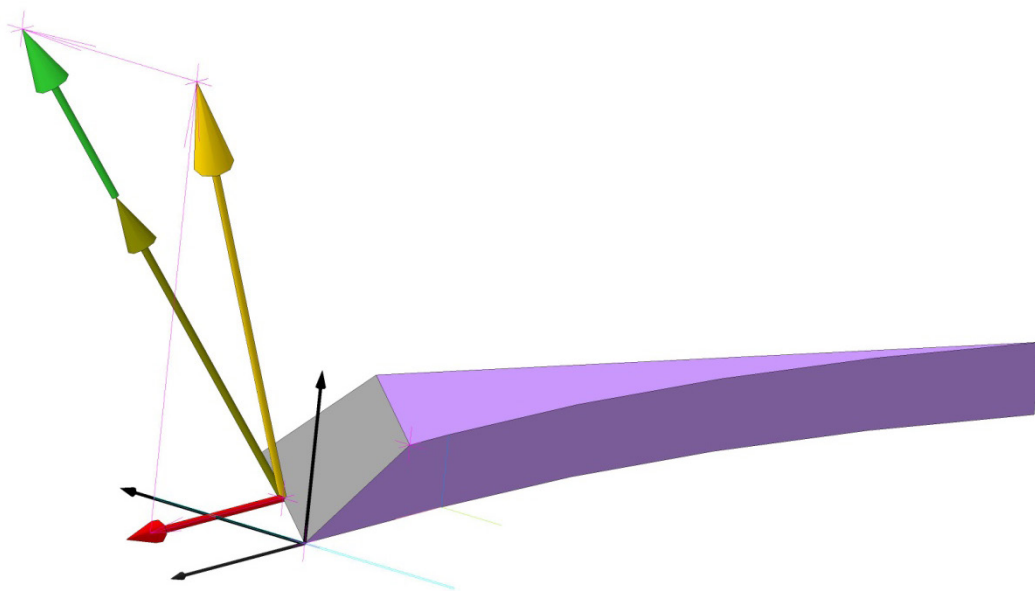


Рисунок 3 – Пространственная схема сил воздействия на грунт кромки лезвия консольного ножа

Figure 3 – Spatial diagram of the forces of action on the ground edge of the blade of the console knife

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{\text{ткрконс}} = u_{\text{отрконс}} + u_{\text{щконс}} + u_{\text{ткрконс}} \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [1]: ширина захвата лезвия консольного ножа $b_k = 30 \text{ мм}$, максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{\text{сл}} = 0,25 \text{ м}$, скорость цепей $v_{\text{ц}} = 1,686 \text{ м/с}$. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние (1):

$$s_k = \frac{1}{0,03 \cdot 0,25} \approx 133 \text{ м/м}^3.$$

Так как скорость ковша равна скорости цепей $v_k = v_{\text{ц}} = 1,686 \text{ м/с}$, то время перемещения ковша на расстояние s_k (2): $\tau_k = \frac{133}{1,686} \approx 78,885 \text{ с/м}^3$.

Площадь отрыва пласта от воздействия кромки лезвия консольного ножа (3):

$$S_{\text{отрконс}} = 0,03 \cdot 133 \approx 4 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 4000000 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Примем для зажатого резания со скольжением предел прочности грунта III категории на растяжение $\sigma_p^B = 0,12 \text{ МПа}$. Условная сила воздействия кромки лезвия одного условного консольного ножа, необходимая для отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр (4):

$$F_{\text{отрконс}} = 0,12 \cdot 4000000 = 480000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения пласта грунта при отрыве $h_{\text{отр}} = 1 \text{ мм}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом при разработке грунта объёмом один кубический метр (5):

$$u_{\text{отрконс}} = 480000 \cdot 0,001 = 480 \text{ Дж/м}^3.$$

Общая длина щели в массиве грунта объёмом один кубический метр $l_{\text{щконс}} = s_k = 133 \text{ м/м}^3$. Площадь щели в массиве грунта от воздействия кромки лезвия консольного ножа (6):

$$S_{\text{щконс}} = 0,018 \cdot 133 = 2,394 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 2394000 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила, необходимая для создания

щели в массиве грунта воздействием лезвия консольного ножа (7):

$$F_{\text{щконс}} = 0,12 \cdot 2394000 = 287280 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при создании щели в массиве $h_{\text{щ}} = 1 \text{ мм}$. Энергия на создание щели в массиве при разработке грунта объёмом один кубический метр (8):

$$u_{\text{щконс}} = 287280 \cdot 0,001 \approx 287 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 3 проекция условной нормальной реакции кромки лезвия консольного ножа $N_{\text{щконс}} = 688000 \text{ Н/м}^3$ (жёлтый вектор). Допустим, коэффициент трения грунта о сталь $f_{\text{с-г}} = 0,5$. Условная сила трения (красный вектор) (9):

$$F_{\text{ткрконс}} = 0,5 \cdot 688000 = 344000 \text{ Н/м}^3.$$

Величины проекций суммы условных сил $F_{\text{отрконс}}$ и $F_{\text{щконс}}$ на оси и соотношения этих проекций к сумме условных сил: $F_{\text{кх}} = 290800 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{кх}} = 0,389(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$; $F_{\text{ку}} = 290800 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{ку}} = 0,389(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$; $F_{\text{кz}} = 623400 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{кz}} = 0,834(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$.

Путь консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр $s_k = 133 \text{ м}$. Условную нормальную силу $N_{\text{скрп}}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{\text{отр}} = 0,018 \text{ м}$ (10):

$$N_{\text{кконс}} = 688000 \frac{0,018}{133} = 93 \text{ Н}.$$

Сила трения (11):

$$F_{\text{ткрконс}} = 0,5 \cdot 93 = 46,5 \text{ Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр (12):

$$u_{\text{ткрконс}} = 46,5 \cdot 133 = 6185 \text{ Дж/м}^3.$$

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр (13):

$$u_{\text{ткрконс}} = 480 + 287 + 6185 = 6952 \text{ Дж/м}^3.$$

Структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – Структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр: затраты энергии на отделение пласта от массива грунта 7%, на создание щели в массиве грунта 4%, на преодоление трения кромки лезвия о грунт 89%

Figure 4 – The structure of energy costs when the blade edge of the cantilever blade interacts with the ground when developing soil with a volume of one cubic meter: energy costs for separating the formation from the soil mass 7%, to create a gap in the soil mass of 4%, to overcome friction of the edge of the blade on the ground 89%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр около 7 тыс. Дж/куб.м. В структуре затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом преобладают затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия. Для определения общих затрат энергии на резание грунта консольными ножами ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов консольных ножей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ, 2020. №1. С. 32–43.
2. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36–42.
3. Карнаухов А.И., Орловский С.Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. №1. С. 20–22.
4. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47–49.

5. Кириллов Ф.Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 44–48.

6. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 34–38.

7. Вершинин А.В., Зубов В.С., Тюльнев А.М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. №8. С. 42–44.

8. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. №3. С. 38–40.

9. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. pp. 115–128.

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

11. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. pp. 142–166.

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

13. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. pp. 96–103.

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

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

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

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

18. Кабашев Р.А., Тургумбаев С.Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. №4. С. 23–28.

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

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

21. Сыромятников Ю.Н., Храмов И.С., Войнаш С.А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. №5. С. 32–39.

22. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. №1. С. 47–54.

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

24. Николаев В.А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

REFERENCES

1. Nikolaev V.A. Soil layer cut off by the aggregate for removing the topsoil from the road sublayer: determination of the chain speed and sizes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):32-43. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43> (In Russ.).

2. Karasjov G.N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Determining of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36–42 (in Russian).

3. Karnauhov A.I., Orlovskij S.N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi frezami [Determining specific energy costs on the cutting process of forest soils with end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20–22 (in Russian).

4. Kravec I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov

gidrofrezoj [Determining critical cutting depth when combined cutting soils with a hydromiller]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49 (in Russian).

5. Kirillov F.F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjavovogo usilija dlja mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin [A deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for multicutting working elements of earth-moving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44–48 (in Russian).

6. Berestov E.I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34–38 (in Russian).

7. Vershinin A.V., Zubov V.S., Tjul'nev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezernyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki mjrzylyh gruntov [Efficiency improvement of the disk milling working mechanisms for the development of frozen soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42–44 (in Russian).

8. Balovnev V.I., Nguen Z.Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Determining of resistances when excavating soils with a ripper according to a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38–40 (in Russian).

9. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003; 36: 115–128.

10. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65: 421–428.

11. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; 86: 142–166.

12. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005; 8: 150–163.

13. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006; 12: 96–103.

14. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007: 448.

15. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevych sistem zemlerojno-transportnyh mashin [The study of controlled knife systems of ground-moving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12–15 (in Russian).

16. Nilov V.A., Fjodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Soil excavation with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7–10 (in Russian).

17. Chmil' V.P. Nasosno-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20 (in Russian).

18. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Jeksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working elements under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23–28 (in Russian).

19. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivlenija rezaniju grunta [About the impact of the speed of the working element on the resistance strength of ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37–43 (in Russian).

20. Konstantinov Ju.V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31–39 (in Russian).

21. Syromjatnikov Ju.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotnoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working elements of the rotary soil processing rippering and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32–39 (in Russian).

22. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoj traektorii

[Power analysis of the mechanisms of movement of working elements of soil processing machines on a predicted trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47–54 (in Russian).

23. Dranjaev S.B., Chatkin M.N., Korjavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a helical G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13–19 (in Russian).

24. Nikolayev V.A. Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschot [Soil processing machines. Theory and calculation]. Yaroslavl, Izd. FGBOU VO YAGSKHA, 2014. 358 p. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО «Ярославский технический университет» (г. Ярославль, Московский пр., 88. e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Construction and Road Machines' Department, Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, 88, Moskovskii prospekt., e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

УДК 625.084: 534.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСКОРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОВАЛЬЦА КАТКА DM-617 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

И.С. Тюремнов, С.Н. Иванов, А.С. Краюшкин
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения задач модернизации грунтовых вибрационных катков с целью повышения уплотняющей способности, надежности и вибробезопасности осуществляется математическое моделирование взаимодействия элементов вибрационного катка между собой и с уплотняемым грунтом. Достоверность разрабатываемых математических моделей проверяется посредством их верификации, т.е. сопоставления с результатами экспериментальных исследований. Однако известные результаты экспериментальных исследований выполнялись на сравнительно небольшом перечне моделей вибрационных катков и видах грунта, а также в установившемся режиме колебаний. В статье представлены результаты экспериментальных исследований вертикальных ускорений колебаний вибровальца катка как в режиме установившейся вибрации, так и в переходных режимах при включении (разгоне) и выключении (останове) вибровозбудителя, что расширяет диапазон возможностей верификации существующих и вновь разрабатываемых математических моделей.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования вертикальных ускорений колебаний вибровальца выполнялись на вибрационном катке DM-617 при уплотнении природной песчано-гравийной смеси. Показания акселерометра содержат высокочастотные гармоники, существенно затрудняющие определение численных значений амплитудных значений ускорений вибровальца, поэтому для цифровой обработки был применен фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц.

Результаты. Установлено, при уплотнении грунта вибрационным катком DM-617 с максимальным вынуждающим усилием в диапазоне изменения динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, амплитудные значения ускорений вертикальных колебаний вибровальца составляют от +65...+77 до -61...-69 м/с². При включении (разгоне) вибровозбудителя амплитудные значения ускорений в 1,1 раза превышают значения вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца и практически не зависят от значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} . При выключении (останове) вибровозбудителя амплитудные значения вертикальных ускорений не превышают значений вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца.

Обсуждение и заключение. Независимость амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 от значений динамического модуля деформации грунта E_{vd} согласуется с полученными ранее результатами экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-614. Полученные численные значения вертикальных ускорений колебаний вибровальца катка DM-617 в режимах установившихся колебаний, а также при включении (разгоне) и выключении (останове) вибровозбудителя позволяют осуществлять верификацию существующих и разрабатываемых математических моделей взаимодействия вибрационных катков с уплотняемым грунтом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, вибровалец, ускорение, фильтрация цифровая, динамический модуль деформации, установившийся режим, переходный режим.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность директору ООО «Завод «Дорожных машин» П.А. Кузнецову и главному конструктору ООО «Завод «Дорожных машин» М.А. Шанову за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований, а также рецензентам.

Поступила 07.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Тюремнов И.С., Иванов С.Н., Краюшкин А.С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Тюремнов И.С., Иванов С.Н., Крайушкин А.С. Результаты экспериментальных исследований ускорений колебаний вибровальца катка DM-617 с использованием технологии цифровой обработки сигнала. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 182-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATIONS OF THE DM-617 VIBRATORY ROLLER USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNOLOGY

Ivan S. Tiuremnov, Sergey N. Ivanov, Arseniy S. Kraiushkin
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Yaroslavl State Technical University",
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. To improve the vibrating rollers in order to increase sealing capacity, reliability and vibration safety, the interaction of vibrating roller parts between each other and with compacted soil is simulated mathematically. The developed models are validated, i.e. compared with the results of experimental studies. However, the known results of experimental studies were obtained based on a relatively small list of vibrating roller models and soil types, as well as in a steady vibration mode. The paper presents the results of experimental studies, which used a vibratory drum of a roller to study its vertical vibration accelerations both in the steady vibration, as well as transient mode at turning the vibration generator on (speedup) and off (halt). This expands the range of opportunities to validate the existing and newly developed mathematical models.

Materials and methods. Experimental studies of vertical vibration accelerations of a drum were conducted using the DM-617 vibrating roller when compacting natural sand-gravel aggregate. The accelerometer readings show high-frequency harmonics, which makes it significantly more difficult to determine amplitude values of vibration accelerations, therefore a low-frequency filter with a boundary frequency of 200 Hz was used for digital processing.

Results. It was determined that when the DM-617 vibrating roller is compacting soil with maximum driving force within the range of variation of dynamic modulus of soil deformation $E_{vd} = 14 \dots 25$ MPa, amplitude values of vertical vibration accelerations of the vibratory drum are from 65... 77 to -61... -69 m/s². At the start-up (speedup) of vibration generator, acceleration amplitudes are 1.1 times higher than vertical accelerations of steady operation mode of the vibrating drum and practically do not depend on the dynamic modulus of soil deformation E_{vd} . At turning off (stop) of the vibration generator, amplitude of vertical accelerations do not exceed the vertical accelerations of the steady operation mode of the vibratory drum.

Discussion and conclusion. The vertical acceleration amplitudes of vibratory drums of DM-617 do not depend on the dynamic soil deformation modulus E_{vd} , and this is consistent with the results of experimental studies of the vibratory drum mounted on DM-614. The obtained vertical vibration accelerations of the drum mounted on DM-617 in the steady vibration mode, as well as at switching the vibration generator on (speedup) and off (halt) make it possible to verify the existing and developed mathematical models of interaction of vibrating rollers with compacted soil.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibrating roller, vibratory drum, acceleration, digital filtering, dynamic deformation modulus, steady mode, transient mode.

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their gratitude to P.A. Kuznetsov, the Director of the OOO Road Machinery Plant, and to M.A. Shanov, the chief designer of the OOO Road Machinery Plant, for their assistance in organizing and conducting the experimental research, and the reviewers as well.

Submitted 07.04.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Tiuremnov I.S., Ivanov S.N., Kraiushkin A.S. Results of experimental studies of accelerations of the DM-617 vibratory roller using digital signal processing technology. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (2): 182-195. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195>

© Tiuremnov I.S., Ivanov S.N., Kraiushkin A.S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетний опыт производства и эксплуатации грунтовых вибрационных катков до настоящего времени большинство производителей этих машин, включая и ведущих мировых, не предоставляют достаточных рекомендаций по обоснованию выбора модели вибрационного катка для выполнения работ в заданных технологических условиях (характеризующихся сочетанием вида грунта, его влажности, толщиной слоя, исходным и требуемым коэффициентом уплотнения) и назначению режимов работы (частоты колебаний, вынуждающего усилия, момента включения и выключения вибрации, скорости движения и требуемого числа проходов) для выполнения работ в заданных технологических условиях¹.
², ³, ⁴, ⁵, ⁶, ⁷ [1, 2]. Это связано с отсутствием методики расчета влияния характеристик и режимов работы вибрационного катка на результаты изменения напряженно-деформированного состояния грунта на различных глубинах при уплотнении грунта в слое заданной толщины или в полупространстве [3, 4].

Анализ подходов, используемых различными авторами для разработки математических моделей [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], на основании которых возможно построение вышеописанной методики расчета, показал, что требуемая математическая модель должна описывать и особенности колебаний элементов вибрационного катка в процессе вибрационного нагружения грунта и процессы изменения напряженно-деформированного состояния грунта не только с целью прогнозирования результата воздействия катка, но и с целью учета влияния изменяющихся свойств грунта на характери-

стики колебательных процессов вибрационного катка. С учетом сложности требуемой математической модели, необходимости принятия достаточно большого количества допущений и недостаточной изученности процессов, происходящих на различных глубинах грунта при вибрационном нагружении его поверхности, математическая модель будет требовать обязательной верификации. Верификация математической модели должна производиться на основании сравнения результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, проводимых желательным образом в полевых условиях на серийно выпускаемых моделях катков при уплотнении традиционно используемых дорожно-строительных материалов. В качестве измеряемых характеристик для последующей верификации могут быть использованы как результаты измерения характеристик вибрационного катка (например, перемещений и ускорений вальца катка и рамы катка), так и характеристики уплотняемого грунта (ускорения и деформации грунта на различных глубинах, напряжения на различных глубинах грунта, значения плотности и модуля деформации грунта и др.). Однако известные результаты экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком⁸ [10, 11, 12, 13, 14] содержат, как правило, ограниченные данные по характеристикам катка в режиме установившихся колебаний, не затрагивая переходные режимы при включении и выключении вибрации и прохождении зоны резонанса. К тому же расширение диапазона условий, в которых проводятся экспериментальные исследования (модели используемых вибрационных катков, виды грунтов, толщины слоев и др.) расширяет диапазон возможно-

¹ Ложечко В.П., Шестопалов А.А., Окунев В.И., Окулов Р.Д. Уплотняющие машины: пособие по выбору оборудования для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей. Рыбинск. Рыбинский дом печати. 2004. 79 с.

² Уплотнение асфальтобетона и грунта // HAMM AG D02 03.2011 212 4832. 2011, 142 с.

³ BOMAG. Soil and Asphalt compaction. 03/04 Art. No WM 9703. URL: https://www.bomag.com/media/editor/WM9703_0403_rdr.pdf (дата обращения: 19.03.2020)

⁴ Caterpillar. Эксплуатационные характеристики // Справочник. Издание 38. Издание Cat® Caterpillar Inc., Пеория, Иллинойс, США. Январь 2008.

⁵ Уплотнение и укладка. Теория и практика // Издание Dynapac Compaction Equipment AB Санкт Петербург. «Рекламное агентство А.М.Г.». 2008. 90 с.

⁶ Грунтовые катки «РАСКАТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Gruntovue-RV.pdf> (дата обращения: 19.03.2020).

⁷ Atlas Weycor 240-1140 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.weycor.ru/bitrix/images/AW-240.pdf> (дата обращения: 19.03.2020).

⁸ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ. Материалы III Международной научно-технической конференции. Омск, 2019. С. 215–223.

стей для верификации существующих и вновь разрабатываемых математических моделей.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований ускорений вальца вибрационного катка DM-617 производства «Завод «Дорожных машин»» (г. Рыбинск, Ярославская обл.) при уплотнении грунта в полевых условиях для использования при верификации математических моделей взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования уплотнения грунта вибрационным катком выполнялись летом 2018 г. при строительстве площадки для стоянки грузового транспорта логистического центра ОРЦ «Ярославль» в районе поселка Новосёлки (Ярославский район, Ярославская область).

В исследованиях использовался вибрационный каток DM-617 производства «Завод «Дорожных машин»» с характеристиками: масса катка конструктивная (эксплуатационная) 15.5(16.0) т; распределение массы по осям (передняя ось / задняя ось) 55% / 45%; диаметр вальца 1550 мм; ширина вальца 2000 мм; линейная статическая нагрузка на ось 43,5 кг/см; двигатель Cummins 6BTA5.9-C175 (номинальная мощность 128 кВт; номинальные обороты 2100 об/мин; рабочие обороты 1800 об/мин); частота колебаний вальца 30/30 Гц; номинальная амплитуда колебания вальца 1,15/1,6 мм; центробежная сила вибровозбудителя 170/230 кН; амортизаторы вальца GMT 58200715 (20 шт.).

Уплотняемый грунт (природная песчано-гравийная смесь с содержанием зерен гравия свыше 5 мм – 40,5 % и песка среднего ($M_{кр}=2,24$) – 59,5 % и наибольшей крупностью зерен гравия – 70 мм, стандартная плотность скелета $\rho_{ск}^{ст}=1750$ кг/м³, оптимальная влажность $W_o=8,22$ %) отсыпался слоем толщиной 0,5 м (рисунок 1).

Ускорения колебаний вибровальца катка регистрировалось акселерометром со встроенной электроникой модели AP2099-100 производства ООО «Глобал-Тест» (г. Саров)⁹, установленном продольной осью вертикально на вальце катка при помощи кронштейна

(см. рисунок 1). Показания акселерометра регистрировались анализатором спектра ZET 017-U8¹⁰ (производства компании ZETLAB, г. Зеленоград) в реальном времени в процессе уплотнения катком грунта. Частота опроса датчика составляла 5000 Гц.

Уплотнение грунта осуществлялось при движении вибрационного катка вперёд с максимальной вынуждающей силой.

Состояние грунта после каждого двух проходов оценивалось значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. Измерение значений E_{vd} осуществлялось после окончания прохода в трех точках поперёк направления движения катка (посередине следа, на правой и на левой стороне следа) и затем усреднялось. Каждая серия измерений значений E_{vd} выполнялась со смещением вперёд на 1,5–2 метра, по отношению к участку предыдущих измерений (см. рисунок 1).

Для обеспечения достоверности результатов, экспериментальные исследования выполнены с тремя повторами, на каждом из которых максимально воспроизводились исходные грунтовые и технологические условия.



Рисунок 1 – Участок проведения экспериментальных исследований и место установки акселерометра на вальце катка DM-617

Figure 1 – Experimental research site and place of accelerometer installation on roller of DM-617

⁹ Вибропреобразователь AP2099-100 [Электронный ресурс]. URL: <https://globaltest.ru/product/vibropreobrazovatel-ar2099-100/> (дата обращения: 19.03.2020).

¹⁰ Анализатор спектра ZET 017-U8 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie-analizatory/analizator-spektra-zet017-u8/> (дата обращения: 19.03.2020).

На рисунке 2 представлена характерная экспериментальная осциллограмма ускорений колебаний вибровальца катка DM-617, зарегистрированная в процессе уплотнения грунта.

На диаграмме (см. рисунок 2) присутствуют характерные зоны:

- стоянка катка с работающим двигателем (интервал времени от 0 до 4 с);
- движение катка без вибрации (интервал времени от 4 до 15 с);
- включение вибровозбудителя и его разгон до номинальной частоты вращения (интервал времени от 15 до 18 с);
- движение катка вперёд с включенной вибрацией (интервал времени от 18 до 92 с);
- выключение вибрации и останов вибровозбудителя (интервал времени от 92 до 95 с);
- движение катка вперёд без вибрации (интервал времени от 95 с).

При анализе представленной осциллограммы (см. рисунок 2) обращает на себя внимание кратковременное увеличение значений ускорений колебаний при включении вибрации (в районе 16–17 с, по шкале времени на рисунке 2) и при выключении вибрации (в районе 92 с, по шкале времени на рисунке 2).

При определении амплитудных значений виброускорений вальца по огибающей осциллограммы виброускорений получаются следующие результаты:

- при включении вибровозбудителя и его разгоне до номинальной частоты вращения амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+140 \text{ м/с}^2$ и -120 м/с^2 ;
- при движении катка вперёд с включенной вибрацией амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+100...+120 \text{ м/с}^2$ и $-85...-100 \text{ м/с}^2$;
- при выключении вибровозбудителя и его останове амплитудное максимальное и минимальное значение ускорений колебаний составляет, соответственно, $+95 \text{ м/с}^2$ и -110 м/с^2 .

Однако более подробное рассмотрение осциллограммы ускорений вальца, например на участке установившейся вибрации, показывает, что в сигнале присутствуют высокочастотные составляющие, размах которых может превышать 40 м/с^2 (рисунок 3). Данные особенности существенно усложняют определение действительных численных значений ускорений колебаний вибровальца.

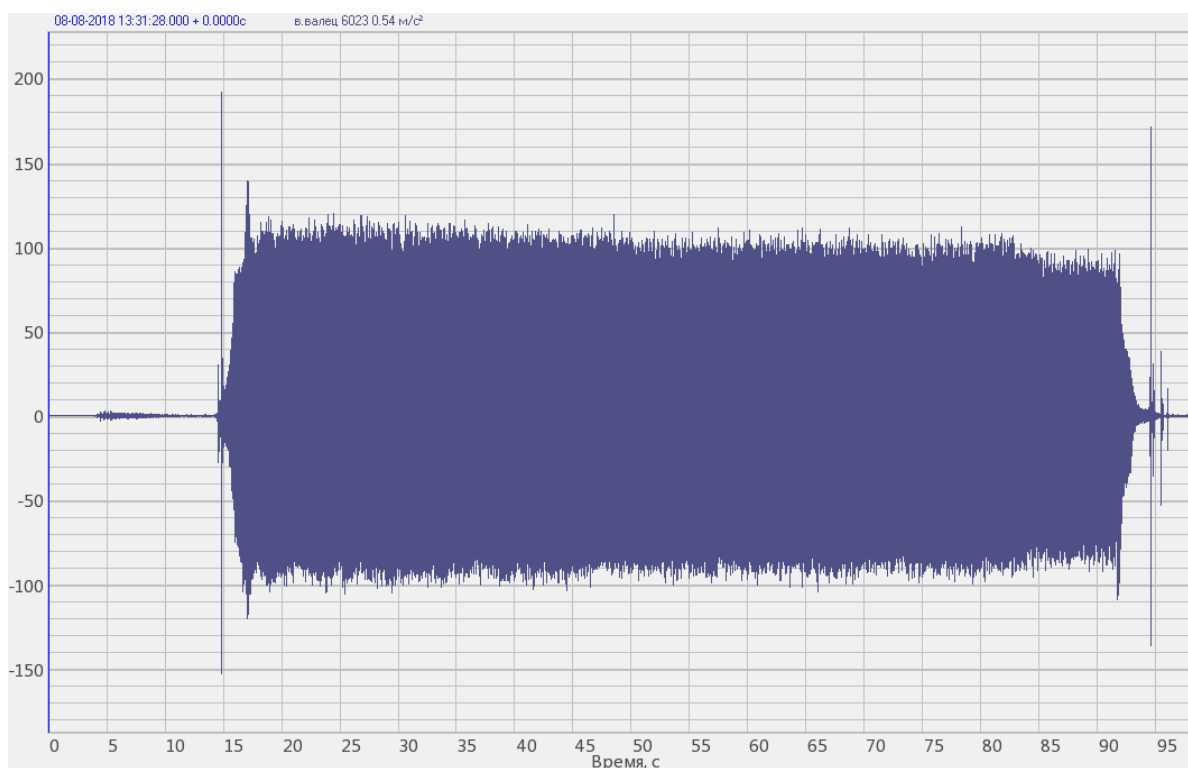


Рисунок 2 – Экспериментальная осциллограмма ускорений колебаний вибровальца катка DM-617

Figure 2 – Experimental oscillograph trace of vibrating rolls DM-617

Спектральный анализ, проведенный с помощью инструмента «Узкополосный спектр», входящего в пакет «Анализ сигналов» программного обеспечения ZETLAB к анализатору спектра ZET 017-U8 показал, что в сигнале датчика ускорения колебаний присутствуют гармоники на частотах:

- 31, 62, 282, 400, 436, 1751 Гц (при включении вибровозбудителя и его разгоне до номинальной частоты вращения);
- 30, 60, 287, 390, 421, 631, 1262, 1473, 1683 и 1893 Гц (при движении катка вперед с включенной вибрацией);
- 20, 30, 390, 1689 Гц (при выключении вибровозбудителя и его останове).

В составе вибрационного катка источником механических колебаний является вибровозбудитель вальца и двигатель. В технических характеристиках вибрационного катка DM-617 указывается, что номинальная частота колебаний вальца составляет 30 Гц, а частота вращения коленчатого вала двигателя равна 35 Гц на номинальных оборотах (2100 об/мин) и 30 Гц на рабочих оборотах (1800 об/мин). Анализ исследований колебаний вибровальца катка [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] позволяет сделать вывод, что при уплотнении различных дорожно-строительных материалов в спектре ускорений колебаний вальца могут присутствовать гармоники и субгармоники на частотах до $3,5f \dots 5f$, где f – частота колебаний

вибровозбудителя катка. Применительно к вибрационному катку DM-617 это соответствует диапазону частот до 150 Гц. Следовательно, колебания с частотой свыше 150...200 Гц не могут быть вызваны особенностями колебаний вибровальца.

Источниками механических высокочастотных колебаний в вибрационном катке могут являться агрегаты гидросистемы и двигателя, приводимые во вращение от коленчатого вала, а также подшипники. Возможны и электрические причины высокочастотных колебаний в регистрируемом сигнале с датчика ускорений, вызываемые наводками от работающих элементов электрооборудования катка, недостаточной экранировкой датчика, проводов датчика, регистрирующего оборудования и др.

Таким образом, при анализе виброускорения вальца катка представляет интерес диапазон частот 0...200 Гц. Частоты, превышающие 200 Гц, вызываются процессами, не имеющими отношения к механическим колебаниям вибровальца и могут быть исключены из рассмотрения, что позволяет использовать для обработки сигнала фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц, подавляющий в сигнале все гармоники с частотой, превышающей 200 Гц.

На рисунке 4 приведен пример результатов обработки исходного сигнала датчика виброускорений (верхняя осциллограмма на рисунке 4) с использованием фильтров низкой ча-

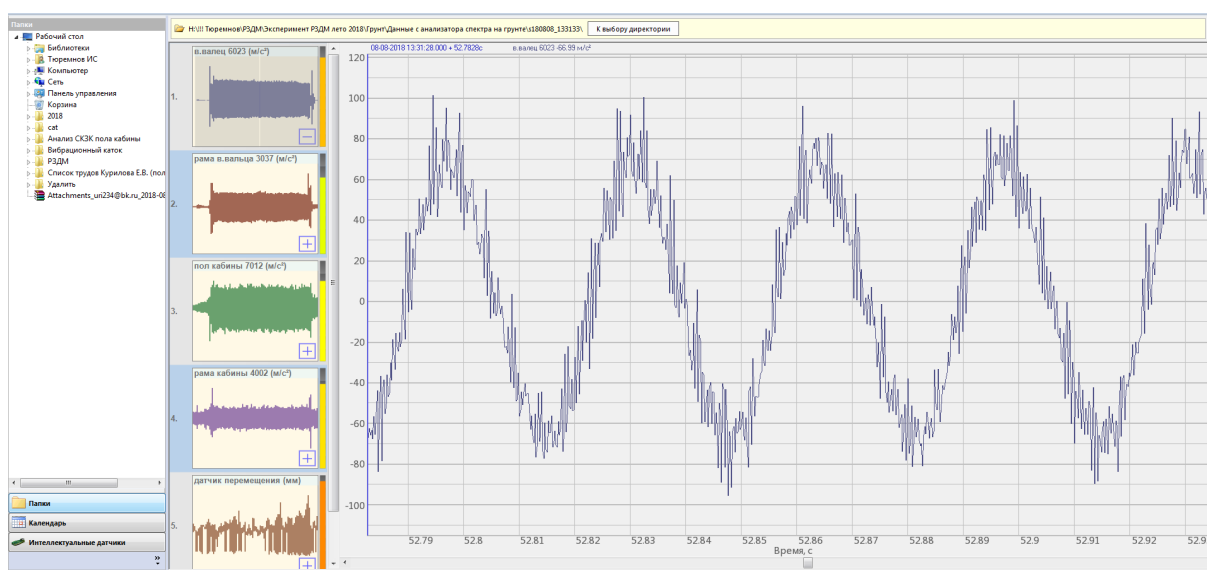


Рисунок 3 – Высокочастотные составляющие в экспериментальной осциллограмме ускорений колебаний вибровальца катка DM-617

Figure 3 – High-frequency components in experimental oscillogram trace of vibrating rolls DM-617

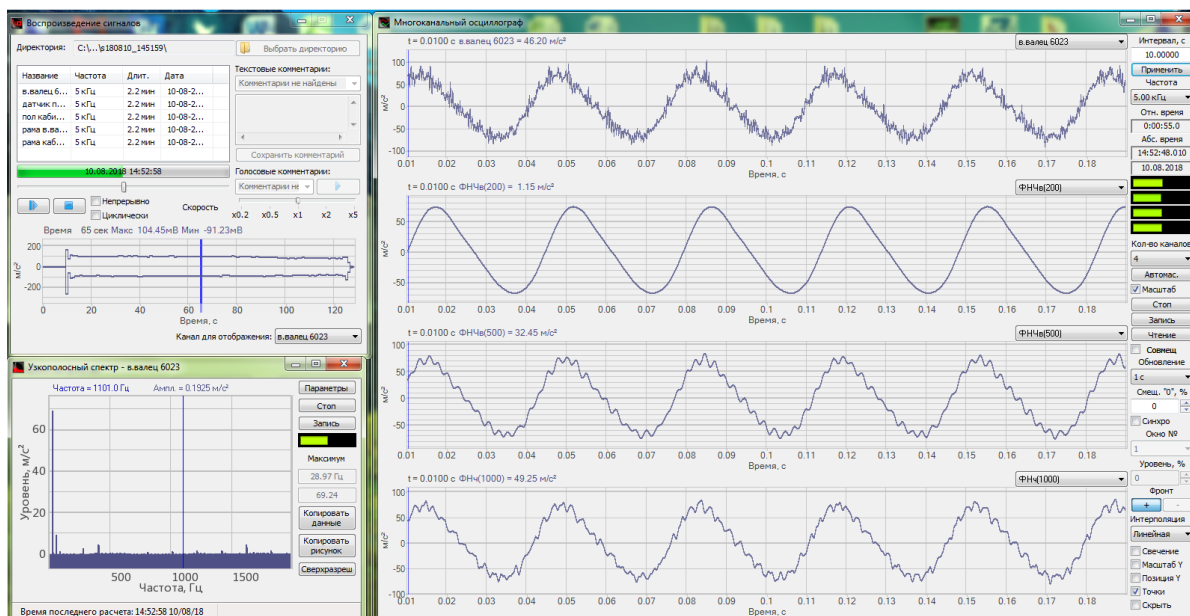


Рисунок 4 – Результаты цифровой обработки исходного сигнала датчика виброускорений (верхняя осциллограмма) с использованием фильтров низкой частоты с граничной частотой 1000 Гц, 500 Гц и 200 Гц

Figure 4 – Results of digital processing initial signal of the vibration acceleration sensor (upper oscillograph trace) using low frequency filters with a boundary frequency of 1000 Hz, 500 Hz and 200 Hz.

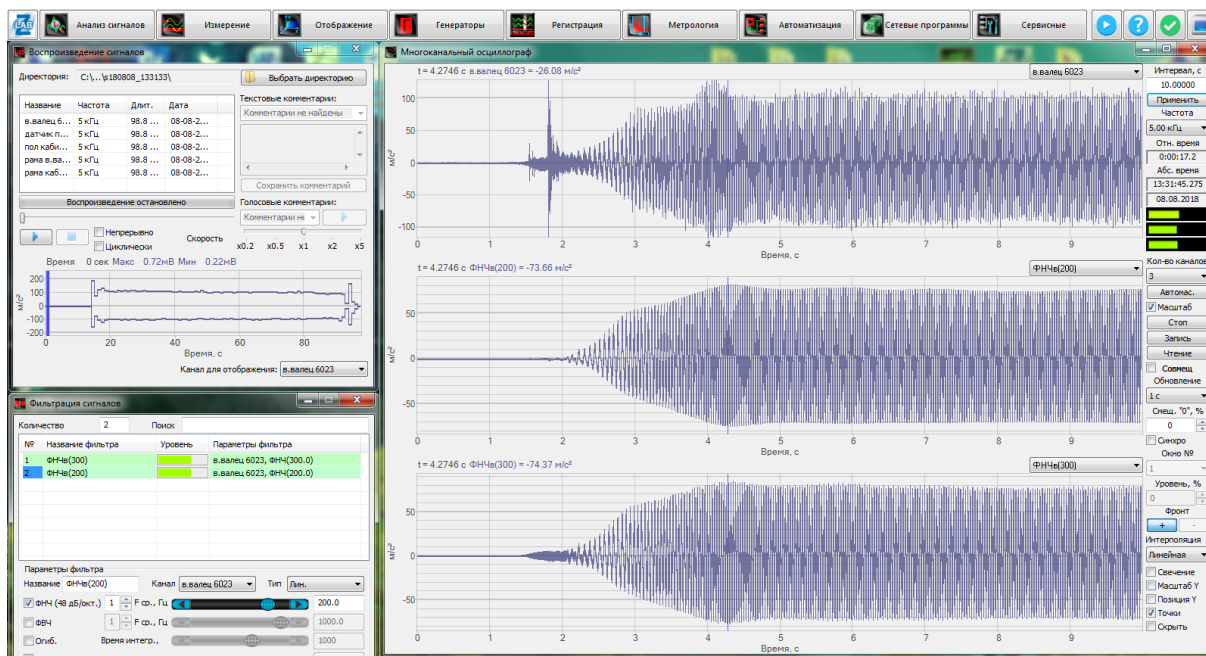


Рисунок 5 – Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений для этапа включения вибрации и разгона вибровозбудителя

Figure 5 – Results of application of low-pass filter with boundary frequency of 200 Hz to acceleration signal processing for the stage of vibration actuation and speedup of vibration exciter

соты с граничной частотой 1000 Гц (нижняя осциллограмма), 500 Гц и 200 Гц. Цифровая фильтрация осуществлялась с использованием инструмента «Формула» из пакета «Автоматизация» программного обеспечения ZETLAB к анализатору спектра ZET 017-U8. Окно воспроизведения сигнала ускорений и спектр ускорений для режима установившихся колебаний вальца также приведены в левой части рабочего окна обработки сигналов (см. рисунок 4). При использовании цифровой фильтрации амплитудные значения ускорений оказываются существенно меньше, чем в исходном сигнале.

Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений (см. рисунки 2, 3) для этапа включения вибрации и разгона вибровозбудителя (рисунок 5) и для этапа выключения вибрации и останова вибровозбудителя (рисунок 6) также показывают существенное уменьшение значений ускорений колебаний вальца по сравнению с исходным сигналом (см. рисунок 2).

Применение цифровой обработки сигнала датчика ускорений с использованием фильтра низкой частоты с граничной частотой 200 Гц обеспечивает подавление всех высокочастот-

ных составляющих обрабатываемого сигнала, не содержащих полезную информацию об особенностях колебаний вальца катка. Поэтому в дальнейшем для получения численных значений ускорений колебаний вибровальца катка использовалась цифровая фильтрация сигнала датчика ускорений с граничной частотой 200 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 при уплотнении грунта с использованием фильтра низкой частоты с граничной частотой 200 Гц приведены на рисунках 7, 8, 9.

Обработка результатов измерений вертикальных ускорений вибровальца катка DM-617 при уплотнении грунта (с учетом трехкратной повторности) показала:

1. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающим усилием, амплитудные значения вертикальных ускорений вибровальца находятся в среднем в диапазоне от +65...+77 до -61...-69 м/с². При этом отсутствует корреляция между значением E_{vd} и амплитудными значениями вертикальных ускорений вибровальца.

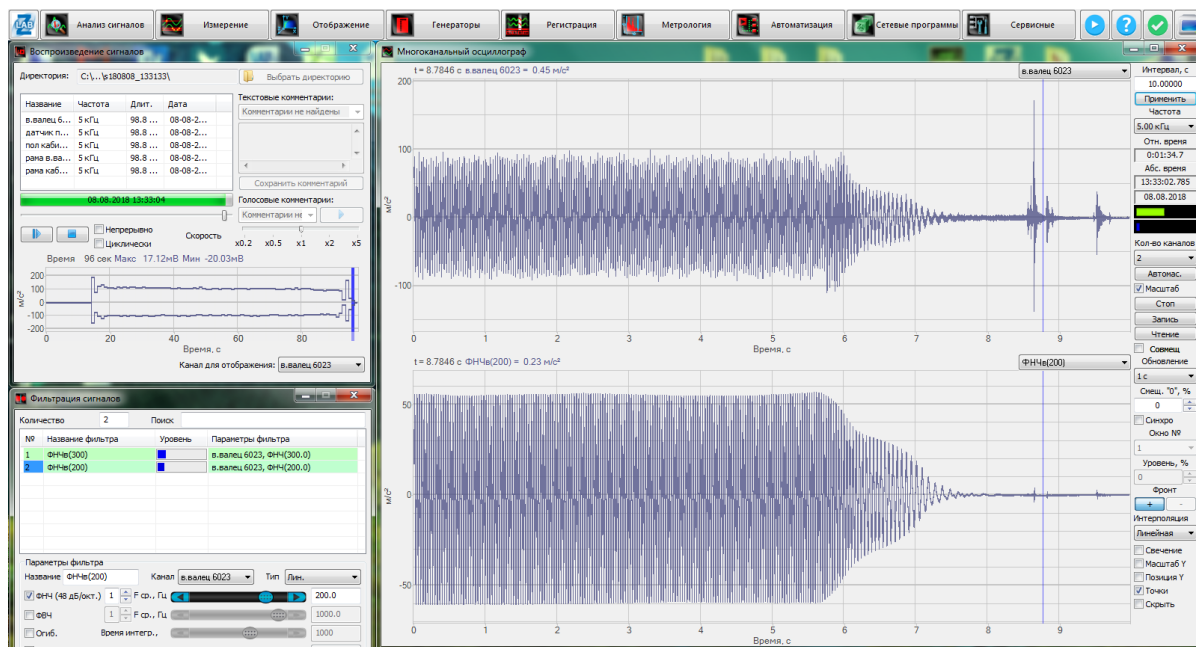


Рисунок 6 – Результаты применения фильтра низких частот с граничной частотой 200 Гц к обработке сигнала ускорений для этапа выключения вибрации и останова вибровозбудителя

Figure 6 – Results of application of low-pass filter with boundary frequency of 200 Hz to acceleration signal processing for the stage of vibration cutting-off and halt vibration exciter

2. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14...25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающим усилием, при включении вибрации и разгоне вибровозбудителя значения вертикальных ускорений вибровальца нахо-

дятся в среднем в диапазоне от $+72...+84$ до $-66...-74$ м/с², что в 1,1 раза превышает значения вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца и практически не зависят от значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} .

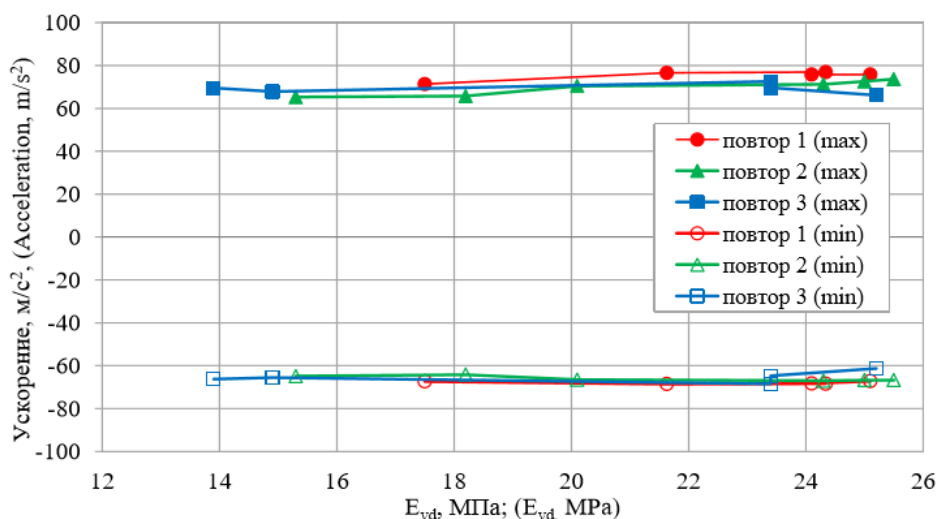


Рисунок 7 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца в процессе установившейся вибрации при уплотнении грунта вибрационным катком ДМ-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 7 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of the vibrating rolls during steady-state vibration during soil compaction by the vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

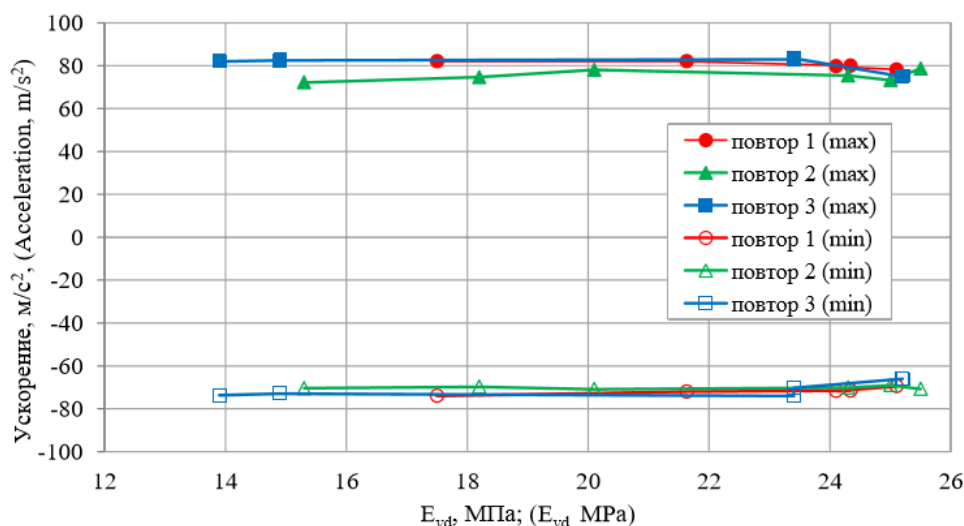


Рисунок 8 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца при включении вибрации и разгоне вибровозбудителя в процессе уплотнения грунта вибрационным катком ДМ-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 8 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of vibrating rolls at actuation of vibration and speed-up of vibration exciter during soil compaction by vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

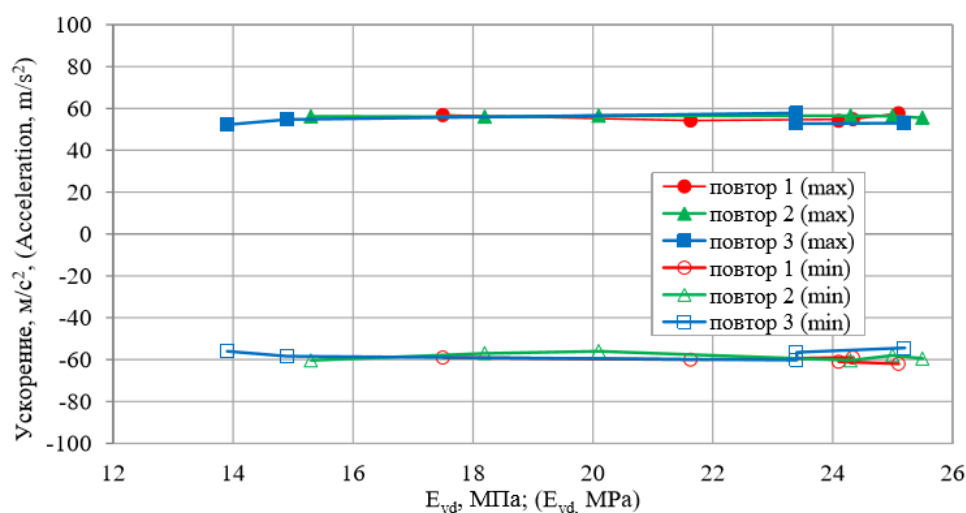


Рисунок 9 – Результаты обработки осциллограмм вертикальных ускорений вибровальца при выключении вибрации и останове вибровозбудителя в процессе уплотнения грунта вибрационным катком DM-617 (движение вперед с максимальной вибрацией)

Figure 9 – Results of processing of oscillograms of vertical accelerations of vibration shaft when vibration and vibration exciter are switched off during soil compaction by vibration roller DM-617 (forward motion with maximum vibration)

3. В исследованном диапазоне значений динамического модуля деформации грунта $E_{vd}=14\ldots 25$ МПа, при работе с максимальным вынуждающем усилием при выключении вибрации и останове вибровозбудителя значения вертикальных ускорений вибровальца находятся в среднем в диапазоне от $+52\ldots +54$ до $-54\ldots -62$ м/с², что не превышает значений вертикальных ускорений установившегося режима работы вибровальца.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предварительной цифровой обработки (фильтрации) сигнала акселерометра при анализе ускорений колебаний вибрационного катка DM-617 в процессе уплотнения грунта позволило исключить из сигнала высокочастотные гармоники, не связанные с механическими особенностями колебаний вибрационного вальца. Это обеспечивает повышение точности определения характера изменений во времени и амплитудных значений ускорений колебаний вальца вибрационного катка, что важно при верификации математических моделей. Причем полученные экспери-

ментальные данные позволяют осуществлять верификацию математических моделей не только для установившегося режима колебаний, но и при переходных процессах, имеющих место при включении и выключении вибрации.

Выявленная независимость амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца от значения динамического модуля деформации грунта в исследованном диапазоне ($E_{vd}=14\ldots 25$ МПа) не вполне соответствует интуитивным представлениям о влиянии возрастающей плотности и жесткости грунта в процессе уплотнения на изменение характера колебаний вибровальца катка. Однако полученные результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-614, проводимыми авторами в 2015 г.¹¹ [21], также показавшими независимость амплитудных значений ускорений вибровальца катка DM-614 от значений динамического модуля деформации грунта в диапазоне $E_{vd}=7\ldots 15$ МПа. Полученный при экспериментальных исследованиях с вибрационным катком DM-614 диапазон изменений амплитудных значений ускорений колебаний вибровальца (от $+54\ldots +56$ до $-54\ldots -56$

¹¹ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ. Материалы III Международной научно-технической конференции. Омск, 2019. С. 215–223.

м/с²) близок к диапазону зарегистрированных амплитудных значений ускорений вибровальца катка DM-617 (от +65...+77 до -61...-69 м/с²), представленному в данной работе с учетом различия в массе и вынуждающем усилии вибрационных катков (соответственно, 16 тонн и 230 кН у катка DM-617; 14 тонн и 215 кН у катка DM-614).

Следует также отметить, что в системах непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками в качестве критерия оценки не используется амплитудное значение ускорений колебаний вальца. Применяются показатели, основанные на амплитудных значениях гармоник спектра ускорений вальца в диапазоне от 0,5f до 3f (где f – частота колебаний вибровальца катка или базовая частота) [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Это подтверждает обоснованность ограничения диапазона частот при использовании фильтра низкой частоты значениями 0...200 Гц (или (0...6,5) f). Также это свидетельствует об отсутствии корреляции значений динамического модуля деформации грунта с амплитудным значением ускорений колебаний вальца, т.к. в противном случае в системах непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками использовался бы более простой для измерения показатель амплитудных значений ускорений колебаний вальца катка вместо показателей, основанных на обработке спектра ускорений колебаний вальца [22].

Таким образом, представленные в статье результаты экспериментальных исследований колебаний вибровальца катка DM-617 позволяют осуществлять верификацию математических моделей взаимодействия элементов вибрационного катка с учетом свойств уплотняемого грунта, имеющих важное значение при проектировании конструкций вибрационных катков, исследовании проблем вибробезопасности катков и повышения эффективности уплотнения грунтов вибрационными катками. Достоверность полученных результатов обеспечивается трехкратным повтором эксперимента и хорошей воспроизводимостью амплитудных значений зарегистрированных ускорений при различных повторях, а также сравнением полученных данных с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований и сопоставлением с существующими сведениями о принципах функционирования систем непрерывного контроля уплотнения грунтов вибрационными катками.

Полученные данные дополняют имеющиеся сведения о результатах экспериментальных исследований уплотнения грунтов вибрационными катками, в том числе в области переходных режимов при включении и выключении вибрации и прохождении зоны резонанса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тюремнов И. С., Филатов И. С., Игнатъев А. А. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта // Вестник ТОГУ. 2014. № 2(33). С. 155–162.
2. Тюремнов И.С., Батраков Д.С. Особенности определения технологических возможностей вибрационных катков // Информационные технологии. Проблемы и решения. Материалы Международной научно-практической конференции. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Том 1(5). С. 140–146.
3. Тюремнов И.С., Чабуткин Е.К., Игнатъев А.А. Повышение эффективности применения технических средств для уплотнения дорожно-строительных материалов // Строительные и дорожные машины. 2009. № 11. С. 9–11.
4. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2012. 140 с.
5. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтов оснований // Труды Ленинградского политехнического института. Л.: Машиностроение. 1972, выпуск 327. С. 114–119.
6. Yoo T-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1979. 105 (10). pp. 1211–1231.
7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // J. Adv. Eng. 2008. №2. pp. 111–120.
8. Anderegg R., Dominik A von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. pp. 41–46. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40803%28187%2941> (дата обращения: 19.03.2020)
9. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 3 (31). С. 102–107.
10. Van Susante P.J., Mooney M.A. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of engineering mechanics. 2008. 134. pp. 684–693.
11. Shen P.H. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes // International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2009). 2009. pp. 2322–2327. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41039%28345%29384> (дата обращения: 19.03.2020)

12. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness // *Journal of engineering mechanics* (American Society of Civil Engineers). 2010. 136 (7). pp. 898–905.

13. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // *Journal of Terramechanics* 1992. 29 (6). pp. 585–597. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002248989290038L?via%3Dihub> (дата обращения: 19.03.2020).

14. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Экспериментальные исследования «активной области» деформируемой среды при вибрационном уплотнении // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2012. № 5 (27). С. 88–94.

15. Mooney M., Adam D. Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork: An Overview // *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston, Massachusetts, 2007. pp. 12 URL: https://www.researchgate.net/publication/268591165_Vibratory_Roller_Integrated_Measurement_of_Earthwork_Compaction_An_Overview (дата обращения: 23.03.2020).

16. Thurner H., Sandstrom A. // *European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials*. Presses Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000. pp. 237–246.

17. Pavana K.R. Vennapusa, David J. White, Max D. Morris Geostatistical Analysis for Spatially Referenced Roller-Integrated Compaction Measurements // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. pp. 813–822.

18. David J. White. A., Pavana K. R. Vennapusa review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks // *Final Report ER10-04*. URL: <https://manualzz.com/doc/8939724/a-review-of-roller-integrated-compaction-technologies-for> (assessed: 23.03.2020).

19. George K. Chang, Qinwu Xu, Rob Rasmussen, David Merritt, Larry Michael, David White, Bob Horan. Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials // *IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology*. 2010. pp. 118 URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/Reports/FHWA-TPF_IC_Final_Report.pdf (дата обращения: 23.03.2020).

20. Scherocman J., S. Rakowski, K. Uchiyama Intelligent. Compaction, does it exist? // *Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Conference*, Victoria, BC. 2007. URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Scherocman_IC%20Does%20it%20Exist_CTAA_2007.pdf (дата обращения: 23.03.2020).

21. Тюремнов И. С., Морев А. С. Системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками: монография. Изд-во ЯГТУ, Ярославль. 2019. 172 с.

22. Тюремнов И. С., Морев А. С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 // *Вестник ТОГУ*. 2015. № 4(39). С. 99–108.

REFERENCES

1. Tjuremnov I. S., Filatov I. S., Ignat'ev A. A. *Obzor rekomendacij proizvoditelej po ispol'zovaniju vibracionnyh katkov dlja uplotnenija grunta* [Review of Manufacturers' Recommendations on the Use of Vibrating Rollers for the Soil Compaction]. *Vestnik TOGU*. 2014; 2(33):155–162 (in Russian).

2. Tjuremnov I.S., Batrakov D.S. Osobennosti opredelenija tehnologicheskikh vozmozhnostej vibracionnyh katkov [Features of the determination of the technological possibilities of vibratory rollers]. *Informacionnye tehnologii. Problemy i reshenija. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2018; 1(5): 140–146 (in Russian).

3. Tjuremnov I.S., Chabutkin E.K., Ignat'ev A.A. Povyshenie jeffektivnosti primenenija tehniceskikh sredstv dlja uplotnenija dorozhno-stroitel'nyh materialov [Improving the efficiency of the use of technical means for compaction of road-building materials]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2009; 11: 9–11 (in Russian).

4. Tjuremnov I.S., Ignat'ev A.A. *Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami: monografija*. Jaroslavl': Izd-vo JaGTU [Soil compaction by vibration rollers: monograph]. 2012: 140 (in Russian).

5. Popov G.N. Vybora parametrov pricepnyh vibracionnyh katkov dlja uplotnenija gruntovyh osnovanij [Selection of parameters of towed vibration rollers for soil bases compaction]. *Trudy Leningradskogo politehnicheskogo instituta*. Leningrad: Mashinostroenie: 1974; 327: 114–119 (in Russian).

6. Yoo T-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1979; 105 (10): 1211–1231.

7. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *J. Adv. Eng.* 2008; 2: 111–120.

8. Anderegg R., Dominik A von Felten., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006: 41–46. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40803%28187%2941> (accessed 19.03.2020).

9. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryj G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noj sistemy «vibracionnyj rabochij organ – grunt» [Mathematical description of the oscillating system “vibrating working body – the ground”]. *Vestnik SibADI*. 2013; 3 (31):102–107 (in Russian).

10. Van Susante P.J., Mooney M.A. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. *Journal of engineering mechanics*. 2008;134: 684–693.

11. Shen P.H. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable

vibration modes. *International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2009)*. 2009: 2322–2327. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41039%28345%29384> (accessed 19.03.2020).

12. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness. *Journal of engineering mechanics (American Society of Civil Engineers)*. 2010; 136 (7): 898–905.

13. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers. *Journal of Terramechanics*. 1992; 29 (6): 585–597. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/00224889290038L?via%3Dihub>. (accessed 19.03.2020)

14. Savel'ev S.V., Buryj G.G. Jeksperimental'nye issledovaniya «aktivnoj oblasti» deformiruemoj sredy pri vibracionnom uplotnenii [Experimental researches of «Active area» of the deformable medium at vibrating consolidation]. *Vestnik SibADI*. 2012; 5 (27): 88–94 (in Russian).

15. Mooney M., D. Adam Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork: An Overview. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston, Massachusetts, 2007: 12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268591165_Vibratory_Roller_Integrated_Measurement_of_Earthwork_Compaction_An_Overview (accessed 23.03.2020).

16. Thurner H. Continuous Compaction Control, CCC/ Thurner H., Sandstrom A. *European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials*. Presses Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000: 237–246.

17. Geostatistical Analysis for Spatially Referenced Roller-Integrated Compaction Measurements/ Pavana K. R. Vennapusa, David J. White, Max D. Morris. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010: 813–822.

18. David J. White., Pavana K. R. Vennapusa A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks. *Final Report ER10-04* [Electronic resource] Available at: <https://manualzz.com/doc/8939724/a-review-of-roller-integrated-compaction-technologies-for> (accessed 23.03.2020).

19. George K. Chang, Qiwu Xu, Rob Rasmussen, David Merritt, Larry Michael, David White, Bob Horan. Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials. *IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology*. 2010: 118 [Electronic resource]. Available at: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/Reports/FHWA-TPF_IC_Final_Report.pdf (accessed 23.03.2020).

20. Scherocman J., Rakowski S., Uchiyama K. Intelligent. Compaction, does it exist? *Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Conference*, Victoria, BC. 2007. Available at: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Scherocman_IC%20Does%20it%20Exist_CTAA_2007.pdf (accessed 23.03.2020).

21. Tjurenov I. S., Morev A. S. *Sistemy nepreryvnogo kontrolja uplotnenija grunta vibracionnymi katkami: monografija* [Systems for continuous monitoring of soil compaction by vibration rollers]. Izd-vo JaGTU, Jaroslavl'. 2019: 172 (in Russian).

22. Tjurenov I. S., Morev A. S. Obzor sistem nepreryvnogo kontrolja uplotnenija grunta dlja vibracionnyh katkov. Chast' 1 [The review of the continuous compaction control systems for soil compaction by vibratory rollers. part 1]. *Vestnik TOGU*. 2015; 4(39): 99–108 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюренов Иван Сергеевич – общая организация работы авторского коллектива, формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, организация и проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи.

Иванов Сергей Николаевич – обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Краюшкин Арсений Сергеевич – обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan S. Tiurenov – general organization of work of the corporate author, formulation of the purpose and objectives of the study, formulation of the purpose and objectives of the research, organization and testing the experimental research, writing of the text of the article.

Sergey N. Ivanov – processing experimental data, preparing material for the article.

Arseniy S. Kraiushkin – processing experimental data, preparing material for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюренов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0003-2261-4153, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: tyurenovis@yandex.ru).

Иванов Сергей Николаевич – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», ВГБОУ ВО Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: sereska65@mail.ru).

Краюшкин Арсений Сергеевич – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023 г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: senya1257@gmail.com).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan S. Tiuremnov – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Head of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0003-2261-4153, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru).

Sergey N. Ivanov – student of the department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University. (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: sereska65@mail.ru).

Arseniy S. Kraiushkin – student of the department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University. (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, E-mail: senya1257@gmail.com).

УДК 625.089.21

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ ПРИ РАЗРУШЕНИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ЕДИНИЧНЫМ РЕЖУЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Д.В. Фурманов, В.С. Чижов, Н.Э. Лысаков
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена результатам исследования сопротивляемости резанию дорожных асфальтобетонных покрытий в процессе удаления изношенных покрытий рабочими органами фрезерных машин. Актуальность работы обусловлена появлением новых марок асфальтобетонных смесей в совокупности с использованием новых типов режущих элементов, для которых затруднительно прогнозировать нагрузки на рабочий орган при решении задач проектирования новых и обосновании режимов работы существующих машин.

Цель. Решается задача исследования взаимодействия единичного режущего элемента дорожной фрезы с материалом при максимальном соответствии скоростных и геометрических показателей процесса резания с реальными машинами.

Материалы и методы. Экспериментальные работы производились путем определения касательной составляющей силы сопротивления резанию, а также работы этой силы на маятниковом стенде с применением регистрирующей аппаратуры. Производилось разрушение четырех различных марок асфальтобетона. Для каждой марки материала проведен двухфакторный эксперимент. Производилась оценка касательных составляющих сил сопротивления резанию в зависимости от толщины срезаемой стружки и температуры материала.

Результаты. В результате проведения эксперимента получены данные, позволяющие обоснованно определять нагрузки на зубьях дорожных фрез, определять энергоемкость процесса и мощность привода рабочего органа. Установлено, что рост касательной составляющей силы сопротивления резанию происходит достаточно интенсивно, с увеличением толщины срезаемой стружки, только на начальных стадиях заглубления резца. При увеличении толщины срезаемой стружки рост касательной составляющей силы сопротивления резанию происходит не столь интенсивно. Во всех случаях на значение силы сопротивления резанию оказывает влияние температура материала, однако это влияние менее значительно для асфальтобетонных смесей, имеющих более высокое содержание щебня.

Обсуждение и заключение. Полученные данные позволяют не только определять касательные силы сопротивления резанию на режущих элементах рабочего органа фрезерной машины, но и находить рациональные способы размещения режущих элементов на рабочем органе, а также определять рациональные режимы работы существующих и новых машин. Это возможно при использовании полученных результатов в математической модели, описывающей процесс работы фрезерного рабочего органа в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, барабан фрезерный, сила сопротивления резанию, стенд маятникового типа, толщина срезаемой стружки, энергоемкость процесса резания.

Поступила 17.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э. Экспериментальное определение сил сопротивления резанию при разрушении асфальтобетона единичным режущим элементом. Вестник СибАДИ. 2020;17 (2): 196-207. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

© Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CUTTING RESISTANCE STRENGTH AT ASPHALT CONCRETE DESTRUCTION WITH A SINGLE CUTTING ELEMENT

Denis V. Furmanov, Vladimir S. Chizhov, Nikita E. Lysakov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Yaroslavl State Technical University”,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the research results on cutting resistance of a road asphalt concrete in the process of the removal of worn coatings by the working elements of milling machines. The relevance of the work is due to the occurring of new brands of asphalt concrete alongside with the use of new types of cutting elements, for which it is difficult to predict the load on the working element when solving the problems of designing new ones and substantiation the operating conditions of the current machines.

The purpose. The objective of the study of the interaction of a single cutting element of a road mill with a material at the best fit of speed and geometric parameters of a cutting process with real machines is solved.

Materials and methods. The experimental work was carried out by determining the tangential component of a cutting resistance strength, as well as the work of this strength on a pendulum desk using a unit recording equipment. Four different types of asphalt concrete were being destroyed. A two-factor experiment was conducted for each type of the material. The tangential components of a cutting resistance strength depending on the thickness of the cut chips and the temperature of the material were evaluated.

Results. As a result of the experiment, the data were obtained that make it possible to reasonably determine the loads on the teeth of road milling machines, to determine a power capacity of the process and the drive power of the working element. It was found that the growth of the tangential component to a cutting resistance strength occurs quite intensively alongside with an increase in the thickness of the cut chips, only at the initial stages of the penetration of the cutter. With an increase in the thickness of the cut chips, the growth of the tangential component to a cutting resistance strength does not occur so intensively. In all cases the temperature of the material has an impact on the value of a cutting resistance strength, but this effect is less significant for asphalt concrete with a higher crushed stone content.

Discussion and conclusion. The obtained data make it possible not only to determine the tangential strength to cutting resistance on the cutting elements of the working element of the milling machine, but also to find rational ways to place the cutting elements on the working element, as well as to determine the rational operation conditions of the current and new machines. This is possible when using the results in a mathematical model that describes the operation of the milling working element as a whole.

KEYWORDS: asphalt concrete, milling drum, cutting resistance strength, desk type pendulum, cut chips thickness, energy intensity of a cutting process.

Submitted 17.02.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E. Experimental determination of cutting resistance strength at asphalt concrete destruction with a single cutting element. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 196-207. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

© Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E.



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

ВВЕДЕНИЕ

Машины с фрезерными рабочими органами прочно вошли в практику строительства и ремонта асфальтобетонного полотна автомобильных работ в основном для удаления изношенных асфальтобетонных покрытий. Главным рабочим органом этих машин является фрезерный барабан, для работы которого используется почти вся энергия двигателя. Фрезерование асфальтобетона сопровождается наличием сил сопротивления резанию на резцах фрезерного барабана. Численные значения этих сил зависят от толщины и формы срезаемой стружки, температуры материала и типа асфальтобетона.

Задачи создания новых машин и повышение эффективности существующих требуют решения численного моделирования процесса фрезерования с использованием обоснованной математической модели. При этом необходимо получать результат приемлемой точности. К сожалению, методик обоснования параметров фрез требуемого качества в открытых источниках не найдено.

Моделирование процесса фрезерования основано на определении касательных и радиальных составляющих сил сопротивления резанию на каждом резце в течение цикла резания, и в последующем векторным суммированием этих сил по рабочей площади барабана для определения суммарных сил и крутящего момента. Если вторая часть задачи решается геометрическим моделированием, результаты которого хорошо отражены, например в работах [1, 2], то ход получения численных значений составляющих сил сопротивления резания далеко не так очевиден.

Отправной точкой для формирования подходов к решению задачи может послужить богатый опыт, накопленный за последнее время в области резания и фрезерования прочных грунтов дорожно-строительных материалов. Так, в работе [1] автор экспериментально определяет силы сопротивления резанию мерзлых и талых грунтов, возникающих на единичном резце фрезерного рабочего органа. Измерялся крутящий момент, соответствующий сопротивлению при резании материала. Установлено,

что для уменьшения энергоемкости необходимо использовать фрезерный барабан с узкими резцами по краям и более широкими резцами в середине. Увеличение диаметра ротора приводит к улучшению геометрии входа резца в забой и уменьшению требуемой скорости вращения ротора. В.Ф. Кулепов с коллегами определяет методику расчета рабочего органа ледорезной машины путем экспериментального исследования нагрузок на зубьях фрезы¹. Полученные зависимости указывают на снижение энергоемкости процесса фрезерования при шахматном расположении зубьев на рабочем органе, а также при чередовании резцов с узким и широким профилем.

Значимыми факторами при определении нагрузок на рабочем органе являются прочностные и деформативные свойства обрабатываемого материала. В работе [3] экспериментальным путем определяется угол скола горной породы при резании его единичным резцом в зависимости от толщины стружки. При увеличении усилия на режущем элементе происходит скол материала образца, который связан с превышением значения силы резания над значением внутренних сил сопротивления материала сдвигу. Установлено, что чем больше толщина срезаемой стружки, тем больше угол скола, а при превышении определенного значения толщины интенсивность изменения угла уменьшается. Очевидно, что при увеличении угла скола снижается энергоемкость процесса фрезерования. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации размещения режущих элементов на роторе, а также правильном выборе значений частоты вращения и подачи фрезерного барабана.

Наибольшей ценностью с точки зрения практического использования обладают результаты экспериментальных исследований [4, 5, 6, 7, 8]. В работе В.Ф. Кулепова представлены результаты исследований по резанию различных образцов асфальтобетона единичными резцами². Полученные данные показывают, что процесс резания существенно зависит от формы режущего элемента. М.П. Бараташвили [9] приводит конкретные значения удельных нагрузок на режущий элемент.

¹ Кулепов В.Ф., Малыгин А.Л., Романов В.В. Определение нагрузок на дискофрезерный рабочий орган ледорезной машины // Транспортно-технологические машины. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Сборник статей. Н. Новгород, НГТУ, 2004. С.79–82.

² Кулепов В.Ф. Исследование процесса резания асфальтобетонных покрытий дискофрезерными машинами // Российская государственная библиотека. Научный электронный архив. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004028111> (дата обращения: 27.12.2019).

К сожалению, применяемые формы режущих элементов с твердосплавными пластинами, которые использовались при экспериментальных исследованиях В. Ф. Кулепова и М.П. Бараташвили на сегодняшний день не используются. Однако эти и другие работы обладают большой практической ценностью.

Одним из недостатков указанных экспериментов является неполное соответствие параметров рабочего процесса фрезерования стендовыми рабочими органами и реальных машин. Использование для задач резания образцов материала фрезерных или строгальных станков не позволяет достичь требуемой скорости резания. Такой недостаток отсутствует при использовании маятникового стенда, успешно применяемого для определения параметров рабочего процесса фрезерования торфяной залежки Л. Н. Самсоновым³. Применительно к асфальтовым бетонам маятниковый стенд был успешно использован⁴ для определения работы сил сопротивления резанию единичным резцом.

Аналитическое определение сил сопротивления резанию грунтов и прочных дорожно-строительных материалов отражены в работах [10, 11]. Авторы указывают на хорошую достоверность результатов. Анализ и изучение факторов, влияющих на процессы резания, представлены в исследованиях⁵ [12, 13, 14]. В работе [15] оценивается влияние скорости фрезерования на эффективность работы машины. В Сианьском университете Цзяотон [16] на основе экспериментальных данных построена модель процесса фрезерования асфальтобетона. Полученные результаты предлагаются использовать для создания новых машин.

Новым направлением в области фрезерования асфальтобетона является поиск путей снижения количества дробленых зерен наполнителя в фрезерованном асфальтобетоне для задач его последующего использования. В работе [17] указывается на то, что при снижении скорости резания до 0,5 м/с и увеличении угла атаки резца до 45 градусов существенно сокращается количество разрушенных зерен наполнителя.

Несоответствие результатов геометрического моделирования работы фрезы с колебательным изменением суммарной толщины срезаемой стружки от значений мгновенной нагрузки на фрезерной машине, оснащенное гидроприводом показано в работе [18]. Это косвенно подтверждает нелинейный характер изменения сил резания с увеличением толщины срезаемой стружки. Энергоэффективность фрезерной машины исследуется путем постановки полевого эксперимента в работе [19]. На основе полученных результатов предлагается использовать модель, позволяющую подстраивать параметры привода под используемые режимы работы фрезерного агрегата. Указывается на существенное увеличение коэффициента использования мощности привода и увеличение коэффициента полезного действия.

Успешные попытки исследования процессов разрушения фрезерными машинами каменных материалов отражены в работах [20, 21, 22, 23]. Показана конечно-элементная математическая модель взаимодействия резца фрезерной машины с образцом. Указывается на высокую сходимость результатов расчета с экспериментальными данными.

Большая группа работ посвящена стойкости фрезерного инструмента [24, 25, 26]. Применительно к асфальтовым бетонам можно отнести исследование [27], посвященное влиянию свойств материала и режимов работы машины на скорость изнашивания резца.

В процессе фрезерования резец срезает стружку сложной формы. На форму стружки влияют соседние борозды, глубина которых не только различна, она еще меняется по траектории хода резца. В такой ситуации вообще сложно определить, что считать толщиной срезаемой стружки. Для каменных материалов данное исследование проводилось в работе [28] на экспериментальной установке. Для асфальтобетонов вопрос остается открытым.

Асфальтобетон представлен сотнями различных марок по всему миру. Требования к асфальтобетонам постоянно совершенству-

³ Самсонов Л. Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985, 211 с.

⁴ Фурманов Д.В., Чижов В.С. Математическое моделирование процесса фрезерования асфальтобетона // Семьдесят вторая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч.1. С. 634– 639.

⁵ Машенский А.А., Машенский Ю.А., Синкевич П.Н. Обоснование кинетических параметров почвообрабатывающих фрез // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Международной научно-технической конференции, посвящ. 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Скотникова В. А., Минск. БГАТУ. 2009. С. 466– 473.

ются. Состав асфальтобетона может отличаться достаточно сильно даже в пределах одной марки. Сопротивляемость резанию существенно зависит от температуры. Все это делает материал трудным для изучения и постановки экспериментов. Поэтому в области исследования рабочих процессов фрезерных машин остается достаточно много «белых пятен», создающих трудности на различных этапах исследований. Однако применительно к существующим машинам и наиболее используемым дорожным покрытиям можно и нужно определять параметры рабочего процесса для создания новых, более эффективных машин и улучшения режимов работы существующих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретический расчет составляющих сил сопротивления резанию требует обоснования модели рабочего процесса и уточнения каждого параметра, влияющего на работу модели. Поскольку модель не может полностью отражать объект, на этапе моделирования неизбежна потеря точности. Параметры модели (такие как вязкость, упругие свойства, приведенная масса, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения и т. д.) также определяются с определенной точностью, а в ряде случаев вообще не существует методик их определения. Все это накладывает ограничения на точность и целесообразность использования аналитических моделей для расчета сил сопротивления резанию. Это обстоятельство

требует развития экспериментальных методов определения работы силы сопротивления резанию, которые бы обладали достаточной точностью и невысокой стоимостью.

Для проведения эксперимента разработан стенд маятникового типа, позволяющий моделировать резание асфальтобетона и других материалов единичным резцом фрезерного рабочего органа. Стенд состоит из маятника и регистрирующей аппаратуры (рисунок 1). Маятник представляет собой металлоконструкцию, основными элементами которой являются стойки 1, жестко установленные на фундаменте при помощи дополнительных растяжек 2. На стойках в подшипниках качения установлен маятниковый рычаг 3 и лимб 4 со стрелками, при помощи которого возможно отслеживать угол отклонения маятникового рычага (рисунок 1, а).

Маятниковый рычаг (рисунок 2) состоит из стойки 1, к которой присоединен механизм изменения вылета 3 дополнительной стойки 2. Режущий элемент 5 устанавливается на площадку 4, шарнирно закрепленную на стойке 2. Для отклонения маятника на необходимый угол установлены проушины 6. При необходимости увеличения энергии, расходуемой на процесс резания образца, существует возможность установки дополнительных инерционных элементов 7. Для передачи касательной составляющей силы сопротивления резанию на датчик 9 установлена система рычагов 8.

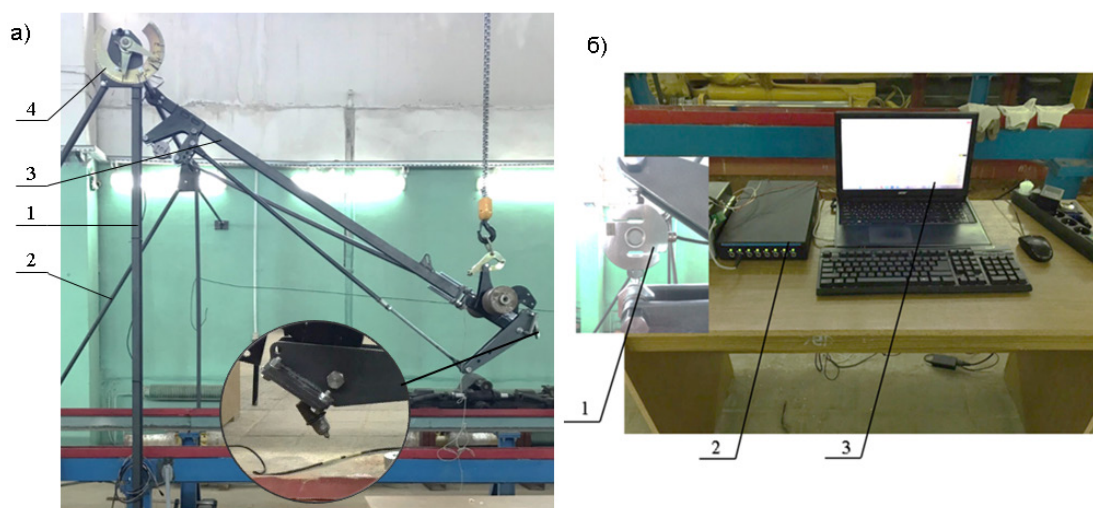


Рисунок 1 – Стенд маятникового типа:
а – конструкция маятника, б – измерительная система

Figure 1 – Desk type pendulum:
a – pendulum structure, b – measuring system

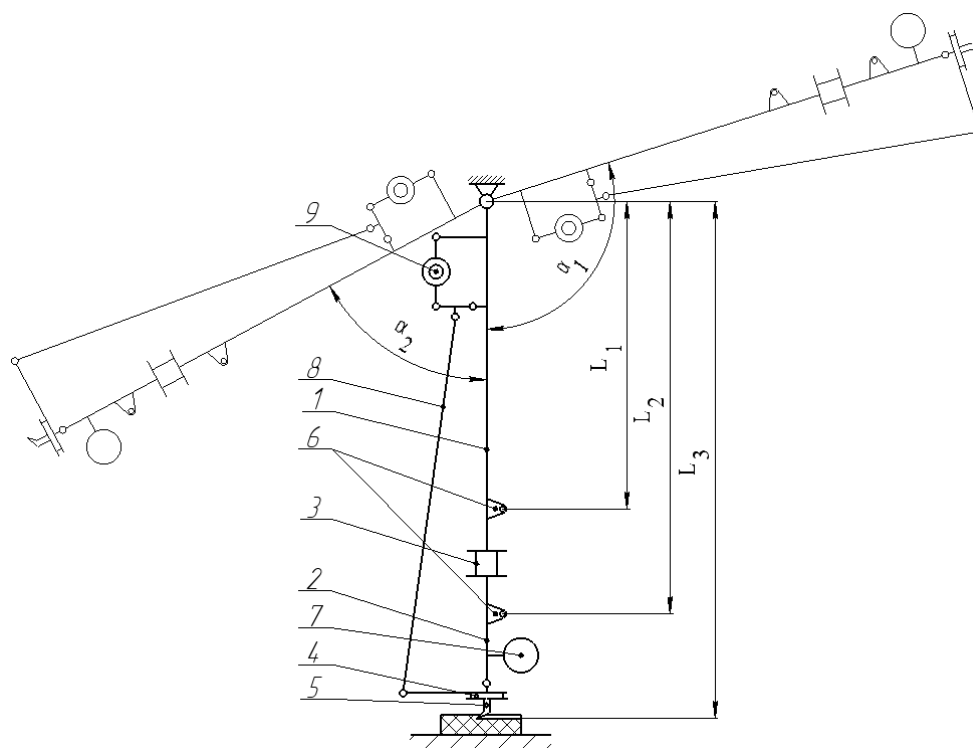


Рисунок 2 – Схема маятникового рычага

Figure 2 – A diagram of a pendulum lever

Измерительная система (рисунок 1, б) выбрана с учетом требований по чувствительности датчика, скорости записи, возможности анализа полученных результатов и возможности фильтрации сигнала. Система состоит из датчика растяжения–сжатия 1, тензометрической станции 2 и персонального компьютера 3. Сигналы, поступающие с датчика, обрабатываются станцией и отображаются на экране ПК. В качестве датчика выступает S-образный тензометрический датчик С2НС3 производства ЗАО «Весоизмерительная компания «Тензо-М» (пос. Красково, Московская обл.), тензометрическая станция – анализатор спектра ZET 017-U8 производства компании ZETLAB (г. Зеленоград, Московская обл.). Питание анализатора спектра и тензодатчика осуществлялось от сети переменного тока 220В с использованием преобразователя напряжения. Результаты измерений отображались в реальном времени на экране ноутбука и записывались на жесткий диск для последующей обработки с помощью программного обеспечения ZETLAB версия 2019.03.31.

В ходе эксперимента предполагалось изменение температуры материала образцов

асфальтобетона для более детального моделирования реальных условий работы фрезерного оборудования. Для этого использовалось несколько видов оборудования: сушильный шкаф SNOL 58/350 и морозильный ларь СНЕЖ МЛ-350 с дополнительным терморегулятором. Образцы выдерживались в камерах до заданных температур не менее двух часов.

Методика определения работы касательной составляющей силы сопротивления резанию опирается на определение потери кинетической энергии маятника в процессе удара:

$$K - K_0 = \sum A_j, \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия, соответствующая началу процесса резания, Дж;
 K_0 – кинетическая энергия в момент выхода резца из зоны резания, Дж.

Пренебрегая сопротивлениями в подшипниках, можно записать

$$\sum A_j = A_p, \quad (2)$$

где A_p – работа касательной составляющей силы сопротивления резанию, Дж.

Кинетическая энергия к моменту резания определяется потенциальной энергией при подъеме маятника:

$$K = m \cdot g \cdot h, \quad (3)$$

где h – высота сбрасывания маятника, м;
 m – масса ударной части маятника, кг.

Кинетическая энергия после процесса резания определяется потенциальной энергией маятника, находящегося в максимально высокой точке после удара:

$$K_0 = m \cdot g \cdot h_0, \quad (4)$$

где h_0 – высота, на которую отбрасывается рабочая часть маятника после совершения работы резания, м.

На лимбах маятника фиксируются угол сбрасывания и угол отклонения после удара (рисунок 3). Высоту сбрасывания h можно определить зависимостью

$$h = L_3 - L_3 \cdot \cos \alpha_1 = L_3 \cdot (1 - \cos \alpha_1), \quad (5)$$

где α_1 – угол сбрасывания;

L_3 – расстояние от оси вращения маятника до точки контакта режущего элемента с материалом, м (см. рисунок 2).

Аналогично определяется высота отклонения h_0 :

$$h_0 = L_3 - L_3 \cdot \cos \alpha_2 = L_3 \cdot (1 - \cos \alpha_2), \quad (6)$$

где α_2 – угол отклонения.

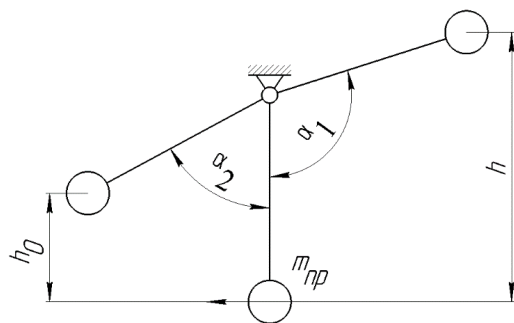


Рисунок 3 – Схема маятника для определения кинетической энергии процесса резания

Figure 3 – A diagram of a pendulum for the determination of kinetic energy of a cutting process

Усредненная работа касательной составляющей силы резания единицей резцом определяется как разница между потенциальными энергиями в момент наибольшего отклонения маятника до удара и после удара

$$A = m_{\text{пр}} \cdot g \cdot (h - h_0), \quad (7)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса, кг.

Так как массы маятника распределены неравномерно по длине маятника, очень важно найти физический эквивалент, позволяющий перейти к математическому маятнику. Таким эквивалентом служит приведенная масса, которая определяется следующим образом:

$$m_{\text{пр}} = \frac{T^2 \cdot M}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_3^2}, \quad (8)$$

где T – период колебаний физического маятника, с;

M – статический момент маятника, Н·м.

Величина M определялась экспериментально путем подвешивания маятника в различных точках.

Представив некоторые математические выкладки, перейдем к рассмотрению экспериментальной части. Резание образцов на маятниковом стенде осуществляется следующим образом:

1) маятник взводится по лимбу на определенный угол, соответствующий требуемой скорости в момент удара;

2) при помощи специального механизма производится сбрасывание маятника, который совершает круговое движение вокруг оси крепления;

3) набирая необходимую скорость, резец входит в зону резания материала, осуществляет резание материала на заданную глубину и выходит из зоны резания материала;

4) в этот момент одновременно производится передача усилия через систему рычагов на тензометрический датчик и съем показаний с датчика в реальный момент времени, которые впоследствии обрабатываются тензометрической станцией, по значениям которого возможно определение силы сопротивления резанию.

В ходе эксперимента измерялись мгновенные значения касательных составляющих сил сопротивления резанию, развиваемые на датчике и усредненные значения этой силы. Последнее значение определялось по зависимости

$$F_{\text{срх}} = \frac{A}{b}, \quad (9)$$

где b – длина образца, м.

Образцы предварительно термостатировались до температур 10 °С, 30 °С и 50 °С. Зна-

чение касательных составляющих сил сопротивления резанию измерялось при толщинах срезаемой стружки 3, 5 и 7 мм.

Для проведения эксперимента были использованы образцы асфальтобетона марок Б-2⁶, (песчаный, фракция до 5 мм, битум марки БНД 130/200⁷), В-3 (песчаный, фракция до

5 мм, битум марки БНД 90/130), МЗП-2 (мелкозернистый, фракция до 10 мм, битум марки МГ 70/130⁸), ЩМА-20 (щебеночно-мастичный, фракция до 20 мм, битум марки СГ 70/130), которые в последующем были зафиксированы в отдельных коробах для жесткого закрепления на станине станда.

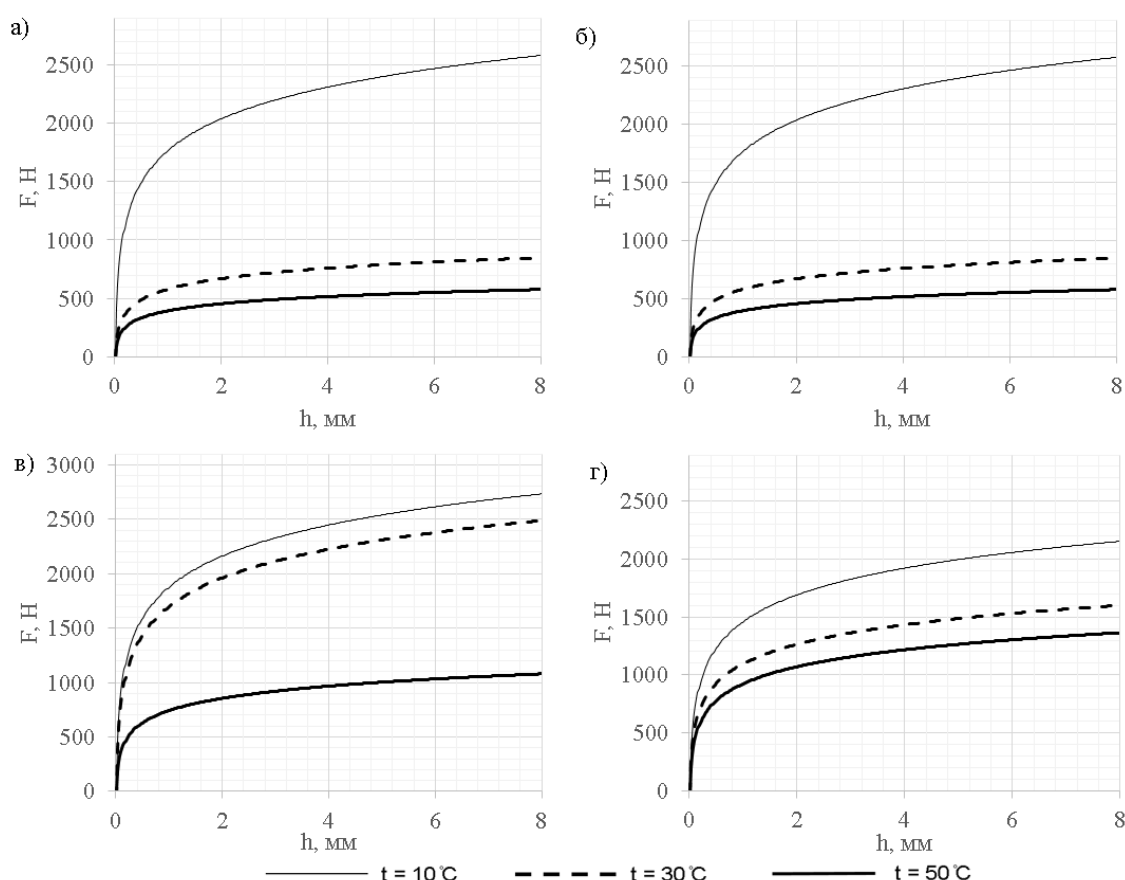


Рисунок 4 – Графики изменения усредненных сил резания при различной температуре материала образцов: а – при резании образцов асфальтобетона марки Б-2, б – при резании образцов асфальтобетона марки В-3, в – при резании образцов асфальтобетона марки МЗП-2, г – при резании образцов асфальтобетона марки ЩМА-20

Figure 4 – Graphs of change of the averaged cutting strengthes at different temperature of a sample material: а – when cutting samples of the asphalt concrete of Б-2 type, б – when cutting samples of the asphalt concrete of В-3 type, в – when cutting samples of the asphalt concrete of МЗП-2 type, г – when cutting samples of the asphalt concrete of ЩМА-20 type

⁶ ГОСТ 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимер-асфальтобетонные, асфальтобетон, полимер-асфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. (Введен 01.11.2014, Москва, Стандартинформ, 2014).

⁷ ГОСТ 22245–90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. (Введен 01.01.1991, Москва, ИПК Издательство стандартов,

⁸ ГОСТ 11955–82 Битумы нефтяные дорожные жидкие. Технические условия. (Введен 01.01.1984, Государственный стандарт союз ССР, 2010).

Таблица
Зависимости усредненных сил резания от толщины срезаемой стружки и температуры материала образцов

Table
The dependencies of averaged cutting strengthes
on a cut chips thickness and a sample material temperature

Марка асфальтобетона Asphalt concrete grade	Уравнение регрессии Regression equation	Коэффициент достоверности аппроксимации, R^2 Approximation validity factor, R^2
Б-2	$F_{срх} = 1971,06 \cdot h^{0,4464} \cdot t^{-0,4249}$	0,81
В-3	$F_{срх} = 43382,75 \cdot h^{0,6722} \cdot t^{-1,7557}$	0,87
МЗП-2	$F_{срх} = 4437,88 \cdot h^{0,2244} \cdot t^{-0,4304}$	0,81
ЩМА-20	$F_{срх} = 900,38 \cdot h^{0,4524} \cdot t^{-0,0758}$	0,76

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка мощности привода фрезерного барабана и энергоемкости рабочего процесса фрезерования может быть осуществлена только при известных средних значениях касательных составляющих сил сопротивления резанию. Определение численных значений этих сил возможно по интегральному показателю – работе сил резания за определенный период.

Ниже приведены значения средних касательных составляющих сил сопротивления резанию, определенных по формуле (9).

Полученные графики (рисунок 4) хорошо показывают нелинейный характер роста сил сопротивления резанию в зависимости от толщины срезаемой стружки. Так, даже при незначительных толщинах срезаемой стружки значение касательной составляющей является достаточно высоким. В значительной степени на силы сопротивления резанию оказывает влияние температура материала, причем для зернистых асфальтобетонов это влияние проявляется в меньшей степени.

Регрессионные зависимости усредненных сил резания, которые могут быть использованы для расчетов при проектировании фрезерного оборудования, для асфальтобетонов различных марок, приведены в таблице.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая сложный характер процессов, возникающих в зоне резания, наибольшей достоверности соответствуют полученные экспериментальные данные. Построенные графики

и уравнения зависимости с большой точностью отражают зависимость сил сопротивления резанию от температуры материала и толщины срезаемой стружки, что подтверждается высоким значением коэффициента достоверности. Это позволяет использовать данные в практических целях.

По результатам эксперимента можно сделать несколько важных выводов:

- при проектировании новых машин и эксплуатации существующих с точки зрения повышения энергоэффективности оборудования следует избегать небольших толщин срезаемой стружки;
- эффективность процесса фрезерования практически всех типов асфальтобетонов увеличивается при температуре выше 30° С;
- энергоемкость процесса фрезерования существенно зависит от типа и марки асфальтобетона.

Полученные данные позволяют не только определять нагрузки на рабочий орган и энергоемкость процесса, но и обоснованно подходить к вопросам размещения режущих элементов на барабане, определять рациональную область режимов работы оборудования, решать задачи выбора режимов работы в зависимости от типа асфальтобетона и температуры.

Развитие данной области исследований может также лежать в области поиска новых, рациональных конструкций фрезерных рабочих органов с комбинированными или регулируемыми параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вершинин А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкопной машины на энергоёмкость его разрушения // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №6. С. 264.
2. Николаев В.А. Ориентировочный расчет мощности циклического резания грунта // *Вестник СибАДИ*. 2019. №3. С. 228—240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>.
3. Чебан А.Ю. Экспериментальные исследования процесса разрушения породы резцами фрезерного рабочего органа // *Вестник ТОГУ*. 2012. №1. С. 125—128.
4. Bilgin N., Demircin M. A., Copur H. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006. №1(43). pp. 139–156.
5. Mostafavi S.S. Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting // *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287323602>. (дата обращения: 20.02.2020).
6. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. Research on adaptive power control parameter of a cold milling machine // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. №9 (16). pp. 1136–1144.
7. Кабашев Р.А., Тургумбаев С.Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // *Вестник СибАДИ*. 2016. №4(50). С. 23–28.
8. Берестов Е.И., Кутылко Р.И. Экспериментальные исследования резания грунта // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2009. №1(22). С. 92–100.
9. Бараташвили М.П. Определение влияющих факторов на режимы работы машины и их значение для разрушения поверхностных слоев асфальтобетонных покрытий // *Научный электронный архив*. URL: <http://econf.rae.ru/article/6606>. (дата обращения: 10.01.2020).
10. Wang X. Bin, Hu Y.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of single tool's milling resistance force of asphalt concrete // *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306182889>. (дата обращения: 10.01.2020).
11. Liu C.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting // *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286723599>. (дата обращения: 10.01.2020).
12. Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта // *Вестник СибАДИ*. 2019. №16(6). С. 642—657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>
13. Вершинин А.В., Ерасов И.А., Левшунов Л.С., Янкович А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкопной машины на энергоёмкость его разрушения // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №6. С. 264–270.
14. Семкин Д.С. О влиянии рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // *Вестник СибАДИ*. 2017. №1(53). С. 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)
15. Hu Y.B., Ma P.Y., Zhang X.R. Modelling and simulating of cold milling machine // *Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*. 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298243176>. (дата обращения: 13.01.2020).
16. Wang X., Hu Y. Numerical calculation on multi-tool milling resistance of asphalt pavement milling machine // *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306193701>. (дата обращения: 13.01.2020).
17. Wu J. Milling process simulation of old asphalt mixture by discrete element // *Construction and Building Materials*. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/327174408>. (дата обращения: 13.01.2020).
18. Gu H.R. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic // *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/293077475>. (дата обращения: 13.01.2020).
19. Peng-Yu M., Yong-Biao H., Zhong-Hai Z. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation // *SIMULATION*. 2011. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549710371385>. (дата обращения: 13.01.2020).
20. Lu Z. Experimental and Numerical Studies on Rock Cutting with Saw Blade and Conical Pick Combined Cutting Method // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/5046873>. (дата обращения: 13.01.2020).
21. Rojek J. Discrete element simulation of rock cutting // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011. №6(48). С. 996–1010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911001043?via%3Dihub>. (дата обращения: 25.03.2020).
22. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits // *Petroleum Exploration and Development*. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322947300> Finite element modeling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. (дата обращения: 25.03.2020).
23. Su O., Ali Akcin N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011. №3(48). pp. 434–442. URL: https://www.academia.edu/4332254/Discrete_element_simulation_of_rock_cutting. (дата обращения: 25.03.2020).
24. Kotwica K. Atypical and innovative tool, holder and mining head designed for roadheaders used to tunnel and gallery drilling in hard rock // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779818303419?via%3Dihub>. (дата обращения: 24.03.2020).

25. Liu S. Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock // *Engineering Failure Analysis*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630716311190?via%3DiHub>. (дата обращения: 24.03.2020).

26. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2008. №1. С. 25–29.

27. Hekimoglu O.Z. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336811965>. (дата обращения: 13.01.2020).

28. Park J.Y. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160916305445?via%3DiHub>. (дата обращения: 31.01.2020).

REFERENCES

1. Vershinin A.V. Vliyanie neravnomernosti skorosti rezaniya merzlogo grunta podkopochnoj mashiny na jenergoemkost' ego razrusheniya [The influence of the unevenness of cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; №6: 264 (in Russian).

2. Nikolaev V.A. Approximate calculation of the circular soil cutting capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019; 3: 228–240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>. (in Russian)

3. Cheban A.YU. Jeksperimental'nye issledovaniya processa razrusheniya porody rezcami frezernogo rabocheho organa [The experimental studies of the process of a rock destruction by cutters of the milling working element]. *Vestnik TOGU*. 2012; 1: 125–128 (in Russian).

4. Bilgin N., Demircin M. A., Copur H. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 1(43): 139–156.

5. Mostafavi S.S. Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting. *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287323602>. (accessed: 20.02.2020).

6. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. Research on adaptive power control parameter of a cold milling machine. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008; 9(16): 1136–1144.

7. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Jeksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [The experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working elements under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4 (50): 23–28 (in Russian).

8. Berestov E.I., Kutynko R.I. Jeksperimental'nye issledovaniya rezaniya grunta [The experimental studies of soil cutting]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 1(22): 92–100 (in Russian).

9. Baratashvili M.P. Opredelenie vlijajushhih faktorov na rezhimy raboty mashiny i ih znachenie dlja razrusheniya poverhnostnyh sloev asfal'tobetonnyh pokrytij [The determination of influencing factors on machine operating conditions and their significance for the destruction of surface layers of asphalt concrete coatings]. *Nauchnyj jelektronnyj arhiv*. URL: <http://econf.rae.ru/article/6606>. (accessed: 01.10.2020) (in Russian).

10. Wang X. Bin, Hu Y.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of single tool's milling resistance force of asphalt concrete. *Zhongguo Gonglu Xuebao / China Journal of Highway and Transport*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306182889>. (accessed: 10.01.2020).

11. Liu C.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting. *Meitan Xuebao / Journal of the China Coal Society*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286723599>. (accessed: 10.01.2020).

12. Nikolaev V.A. Analiz ciklicheskogo rezaniya grunta [The analysis of cyclic soil cutting]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. №16(6). Pp. 642–657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657> (in Russian).

13. Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Yankovich A.V. Vliyanie neravnomernosti skorosti rezaniya merzlogo grunta podkopochnoj mashiny na jenergoemkost' ego razrusheniya [The influence of the unevenness of a cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; 6: 264–270 (in Russian).

14. Semkin D.S. O vlijanii raboчих organov zemlerojnyh mashin na silu soprotivleniya grunta rezaniju [About the influence of the working elements of an earth-moving machinery on the strength of soil resistance to cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1(53): 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43) (in Russian).

15. Hu Y.B., Ma P.Y., Zhang X.R. Modelling and simulating of cold milling machine. *Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*. 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298243176>. (accessed: 13.01.2020).

16. Wang X., Hu Y. Numerical calculation on multi-tool milling resistance of asphalt pavement milling machine. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh / Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306193701>. (accessed: 13.01.2020).

17. Wu J. Milling process simulation of old asphalt mixture by discrete element. *Construction and Building Materials*. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/327174408>. (accessed: 13.01.2020).

18. Gu H.R. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic. *Zhongguo Gonglu Xuebao / China Journal of Highway and Transport*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/293077475>. (accessed: 13.01.2020).

19. Peng-Yu M., Yong-Biao H., Zhong-Hai Z. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power controls simulation. *SIMULATION*. 2011. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549710371385>. (accessed: 13.01.2020).

20. Lu Z. Experimental and Numerical Studies on Rock Cutting with Saw Blade and Conical Pick Combined Cutting Method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/5046873>. (accessed: 13.01.2020).

21. Rojek J. Discrete element simulation of rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011; 6(48): 996–1010.

22. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. *Petroleum Exploration and Development*. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322947300>. (accessed: 25.03.2020).

23. Su O., Ali Akcin N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011; 3(48): 434–442.

24. Kotwica K. Atypical and innovative tool, holder and mining head designed for roadheaders used to tunnel and gallery drilling in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779818303419?via%3Dihub>. (accessed: 24.03.2020).

25. Liu S. Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock. *Engineering Failure Analysis*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630716311190?via%3Dihub>. (accessed: 24.03.2020).

26. Popov S.N., Antonyuk D.A. Issledovanie vliyaniya vneshnih uslovij iznashivaniya na iznosostojkost' rez-cov dorozhnoj frezy [The study of the influence of external wear conditions on the wear resistance of cutters of a road mill]. *Novi materiali i tehnologiji v metalurgiji ta mashinobuduvanni*. 2008; 1: 25–29.

27. Hekimoglu O.Z. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336811965>. (accessed: 13.01.2020).

28. Park J.Y. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160916305445?via%3Dihub>. (accessed: 31.01.2020).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фурманов Денис Владимирович – Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, разработка и создание испытательного стенда, корректирование материала статьи.

Чижов Владимир Сергеевич – Обзор предыдущих исследований, разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Лысаков Никита Эдуардович – Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis V. Furmanov – Corporate author organization work, areas formation and the problem in the study formulation, objectives and methods of research setting, a test stand development and creation, the material of the article correction.

Vladimir S. Chizhov – Review of previous studies, a test stand development and creation, of experimental studies preparation and testing, the obtained data processing, the material for the article preparation.

Nikita E. Lysakov – A Test stand development and creation, experimental studies preparation and testing, the obtained data processing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0002-6932-6477, Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: denis_furmanov@mail.ru).

Чижов Владимир Сергеевич – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0003-0202-4885, Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: volodymyrtchizhoff@yandex.ru).

Лысаков Никита Эдуардович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: war788game@mail.ru).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis V. Furmanov – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0002-6932-6477, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: denis_furmanov@mail.ru).

Vladimir S. Chizhov – Assistant of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0003-0202-4885, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: volodymyrtchizhoff@yandex.ru).

Nikita E. Lysakov – Student of the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, E-mail: war788game@mail.ru).

УДК 625.085

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Р.А. Чухарев, Н.Е. Тарасова, Е.К. Чабуткин

ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,

г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве современных скоростных магистралей большое внимание уделяется уплотнению оснований, состоящих из грунтов естественного сложения. Они требуют использования специального оборудования, в том числе и самоходных машин, осуществляющего уплотнение в непрерывном цикле. Но при его проектировании возникают определенные трудности по определению параметров ускорителей удара и массы ударной плиты. Цель работы – изучение влияния параметров рабочего оборудования на процесс деформирования грунта.

Материалы и методы. Для проверки влияния параметров трамбующего оборудования на процесс уплотнения был выбран способ математического моделирования процесса с использованием реологических моделей. Рабочий цикл трамбовки ударного действия условно разделен на четыре фазы. Дано математическое описание движения штампа и грунта в каждой из фаз движения. Рассмотрено изменение напряженного состояния во времени в теле грунтового полупространства.

Результаты. Была получена зависимость изменения напряженного состояния грунта во времени при различных жесткостях пружинного ускорителя удара и изменении массы штампа. Анализ зависимостей показал, что при проектировании оборудования ударного действия, предназначенного для уплотнения грунтов естественного сложения, требуется согласование пиковых напряжений от массы штампа и жесткости ускорителей удара. Это позволит растянуть во времени действие напряжений, быстрее сформировать уплотненное ядро в грунтовой полупространстве и потребует меньшего числа ударов по одному следу для получения требуемой плотности материала.

Обсуждение и заключение. Предложенная модель трамбующего оборудования позволила рассмотреть процессы, происходящие в грунтовой полупространстве, получить сравнительные характеристики массы штампа и жесткости ускорителей удара. Полученные данные хорошо коррелируются с данными других авторов. Результаты исследования могут быть полезны инженерным работникам, занимающимся разработкой новой техники интенсифицирующего действия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трамбование, грунт, удар, моделирование имитационное, модель реологическая, напряженное состояние, время.

Поступила 27.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Имитационное моделирование ударного процесса уплотнения грунтов. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (2): 208-218. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>

© Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>

SIMULATION OF IMPACT PROCESS OF SOIL COMPACTION

Roman A. Chukharev, Natalia E. Tarasova, Evgenii K. Chabutkin
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Yaroslavl State Technical University”,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. During the construction of modern highways, much attention is paid to compaction of bases consisting of natural soils. They require the use of special equipment, including self-propelled machines, performing compaction in a continuous cycle. But when designing it, certain difficulties arise in determining the parameters of impact accelerators and the mass of the impact plate. The purpose of the work is to study the influence of the parameters of working equipment on the process of soil deformation.

Materials and methods. To check the influence of the parameters of the tamper equipment on the compaction process, a method of mathematical modeling of the process using rheological models was chosen. The working cycle of impact ramming is divided into four phases. A mathematical description of the movement of the stamp and soil in each of the phases of movement is given. The change in the stress condition in time in the body of the soil half-space is considered.

Results. The time dependence of the soil stress condition was obtained for different stiffnesses of the spring impact accelerator and the change in the stamp mass. A joint analysis of the obtained dependencies showed that when designing impact equipment intended for compaction of naturally occurring soils, it requires matching the peak stresses from the mass of the stamp and the stiffness of the impact accelerators. This will make it possible to stretch the action of stresses in time, to form a compacted core in the soil half-space quickly and require a smaller number of strokes on one track to obtain the required material density.

Discussion and conclusion. The proposed model of tamper equipment made it possible to consider the processes occurring in the soil half-space, to obtain comparative characteristics of the stamp mass and the rigidity of impact accelerators. The obtained data correlate well with the data of other authors. The results of the study may be useful to engineers involved in the development of new techniques of intensifying action.

KEYWORDS: *tamping, soil, impact, simulation modeling, rheological model, stress state, time.*

Submitted 27.03.2020, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Chukharev R.A., Tarasova N.E., Chabutkin E.K. Simulation of impact process of soil compaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 208-218. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>

© Chukharev R.A., Tarasova N.E., Chabutkin E.K.



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

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве автомобильных дорог немаловажное значение имеет уплотнение различных конструктивных слоев. При этом большое внимание уделяется уплотнению грунтов естественного сложения нижнего основания¹ [1, 2]. Такие грунты обычно имеют недостаточную плотность, но повышенную прочность сцепления между отдельными агрегатами грунтового полупространства², что требует приложения к ним нагрузок, превышающих пределы прочности уплотняемого материала. Для этих целей требуются специальные установки динамического действия с

повышенной энергией удара³ [3]. В настоящее время для уплотнения грунтов естественного сложения используются специальные машины, которые в большинстве своем выполнены в единичных экземплярах и представляют стационарное оборудование⁴ [4, 5, 6, 7]. Однако применение подобных машин при строительстве протяженных объектов, таких как основания автомобильных дорог, основания железнодорожных путей, не представляется возможным. Для этих целей нужна самоходная машина, осуществляющая уплотнение в непрерывном цикле. Такое оборудование разработано на кафедре СДМ ЯГТУ [8].

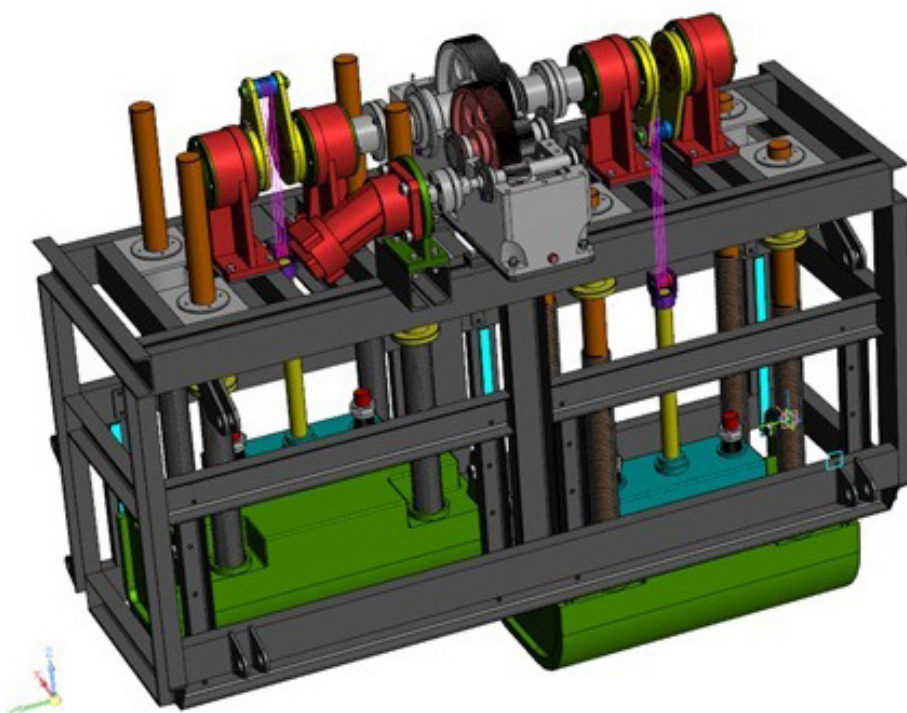


Рисунок 1 – 3D модель трамбовки

Figure 1 – 3D model of tamping

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунта земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт. 1975. 285 с.

² Chabutkin E.K. Change of Structure of Dispersion Material Under Dynamic Loads. Proceeding of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICE, 2019)/lecture Notes in Mechanical Engineering // Springer Nature Switzerland AG 2020/ V2, p.559-565. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_59

³ Dobrescu C.-F., Brăguță E. Optimization of Vibro-Compaction Technological Process Considering Rheological Properties/ Springer Proceedings in Physics 14th. Ser. "Acoustics and Vibration of Mechanical Structures-AVMS-2017 - Proceedings of the 14th AVMS Conference. 2018. pp. 287-293.

⁴ Афанасьев А.А., Чабуткин Е.К. Уплотнение грунтов трамбовками ударного действия. Семьдесят вторая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019. г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2019. С. 579–583.

Конструктивные особенности предлагаемой машины (рисунок 1) заключаются в том, что используется два силовых агрегата, работающих в противофазе.

Кроме того, в конструкции каждой секции применены ускорители удара, что позволяет интенсифицировать процесс уплотнения и получить компактные размеры прицепного оборудования. Однако некоторые трудности вызывает определение параметров ускорителя и массы ударной плиты.

Анализ исследований уплотнения грунтов трамбованием [9, 10, 11] показывает, что развитие напряжений на поверхности контакта штампа с грунтом, при ударе одномассным штампом, определяется только параметрами штампа (удельным импульсом удара и соотношением скорости удара к статическому давлению) и свойствами грунта.

Явление удара описывается известным выражением [12]:

$$\int_0^{\tau} F dt = m(V_1 - V_2),$$

где τ – время удара; F – сила, развиваемая в процессе удара; m – масса рабочего органа; V_1 – скорость рабочего органа в начале удара; V_2 – скорость рабочего органа в конце удара (обычно принимается равной нулю).

Анализ приведённой выше формулы показывает, что силы, развиваемые в процессе удара, можно регулировать за счет изменения ударной массы и скорости штампа в момент соприкосновения последнего с поверхностью грунтового полупространства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс трамбования характеризуется малой продолжительностью воздействия напряжений и значительной глубиной распространения напряженно-деформативного состояния. Данные машины могут осуществлять уплотнение слоями большой толщины [13].

Экспериментальное исследование процесса уплотнения грунта и изучение влияния различных параметров на него довольно затруднительно и требует больших затрат по времени. Кроме того, нестабильность характеристик уплотняемого материала может внести определенные трудности в оценку полученных результатов. Поэтому для проверки влияния параметров трамбующего оборудования на процесс уплотнения был выбран способ имитационного математического моделирования процесса с использованием реологических моделей (рисунок 2).

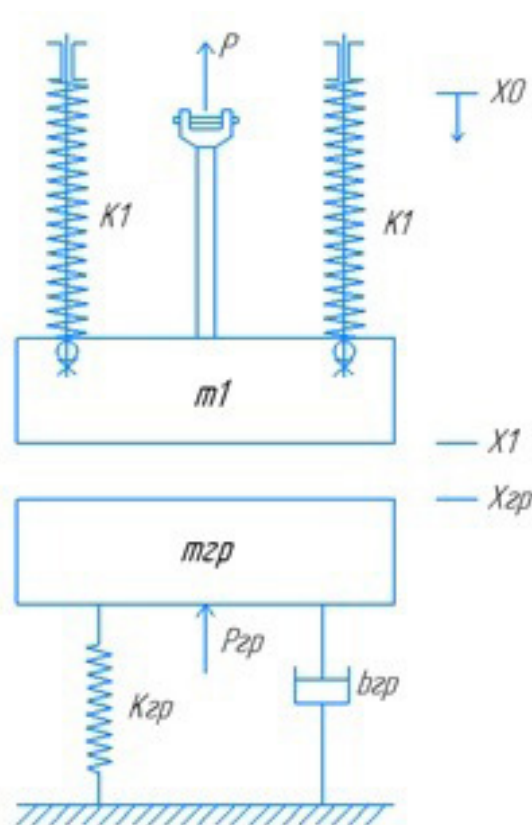


Рисунок 2 – Реологическая модель трамбовки

Figure 2 – Rheological model of tamping

Уплотняемый грунт под воздействием внешних нагрузок обладает упруго-вязко-пластичными свойствами. Однако при ограничении времени контакта плиты с грунтом пластическая составляющая сопротивления материала деформированию может рассматриваться как составляющая вязкого сопротивления [14]. При этом можно принять следующие допущения: трамбующая плита абсолютно жесткая; поверхность рабочего органа плоская; площадь контакта является величиной постоянной, не меняющейся в процессе работы машины.

Параметры грунта в процессе уплотнения также подвержены изменению. Однако в пределах рассмотрения отдельных циклов нагружения эти изменения не существенны и ими можно пренебречь.

Само по себе уплотнение является весьма сложным процессом, с множеством взаимосвязанных факторов, так или иначе оказывающих влияние на конечный результат. Работа всех уплотняющих машин связана с приложением к поверхности уплотняемого материала повторяющихся циклических нагрузок.

При этом деформация материала зависит от величины нагрузки, определяемой контактными давлениями, скорости изменения напряженного состояния и продолжительности действия нагрузки, а следовательно и от числа повторности ее приложения⁵.

В машинах ударного действия сбрасываемый груз в момент касания грунта обладает определенной кинетической энергией $E_1 = m_1 \frac{V^2}{2}$, которая расходуется на преодоление упруго-вязких сил сопротивления среды. При этом суммарную силу сопротивления упруго-вязких сил в грунте $P_{гр}$ можно записать как

$$P_{гр} = k_{гр}X + b_{гр}\dot{X},$$

где $k_{гр}$ – жесткость деформируемого объема грунта, $b_{гр}$ – коэффициент вязкого сопротивления грунта, X – деформация грунта, V^2 – скорость сбрасываемого груза массой m_1 .

Полагая движение трамбуемого органа после встречи с грунтом равноускоренным, можно определить скорость движения системы «рабочий орган – грунт»

$$V_{гр} = (m_1 / (m_1 + m_{гр}))V,$$

где $m_{гр}$ – присоединенная масса грунта.

Кинетическая энергия штампа трамбовки, представленной на рисунке 2, будет образовываться не только от свободного движения массы m_1 , но и от действия пружинных ускорителей с жесткостью k_1 . При этом интересно оценить процессы, происходящие в грунте, в зависимости от соотношения массы штампа и параметров пружинных ускорителей.

Рабочий цикл трамбовки ударного действия можно условно разделить на четыре фазы.

Первая фаза. Движение ударной плиты m_1 вверх и сжатие пружинных ускорителей. Эту фазу движения можно описать дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 - 4 \cdot k_1 \cdot x_1 = -P + m_1 \cdot g \\ m_{гр} \cdot \ddot{x}_{гр} + k_{гр} \cdot x_{гр} + b_{гр} \cdot \dot{x}_{гр} = m_{гр} \cdot g \end{cases},$$

при условии выполнения следующих соотношений: $x_{гр} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 < 0$.

Вторая фаза. Движение массы m_1 вниз, до касания с грунтом. Этот процесс можно описать как $x_{гр} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 < 0$.

$$\begin{cases} -m_1 \cdot \ddot{x}_1 + 4 \cdot k_1 \cdot x_1 = m_1 \cdot g \\ m_{гр} \cdot \ddot{x}_{гр} + k_{гр} \cdot x_{гр} + b_{гр} \cdot \dot{x}_{гр} = m_{гр} \cdot g \end{cases},$$

при соблюдении условий $x_{гр} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 > 0$.

Третья фаза. Касание ударной плиты с грунтом (удар) и движение совместно штампа и присоединенной массы грунта,

$$\begin{cases} (m_1 + m_{гр}) \cdot \ddot{x}_1 + k_{гр} \cdot x_1 + k_1 \cdot x_1 \cdot 4 + b_{гр} \cdot \dot{x}_{гр} = (m_1 + m_{гр}) \cdot g, \\ x_1 = x_{гр} \end{cases},$$

при этом должны выполняться условия: $x_{гр} = x_1; \dot{x}_{гр} = \dot{x}_1; \dot{x}_1 > 0$.

Четвертая фаза. Восстановление грунта. После отрыва штампа от грунтового полупространства сжатый грунт начинает восстанавливаться. При этом в теле грунтового полупространства создается уплотненное ядро и при следующих ударах нарастание плотности происходит снизу вверх. Штамп движется со скоростями значительно выше, чем происходит восстановление грунта и его движение описывается дифференциальными уравнениями, соответствующими первой фазе движения.

⁵ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

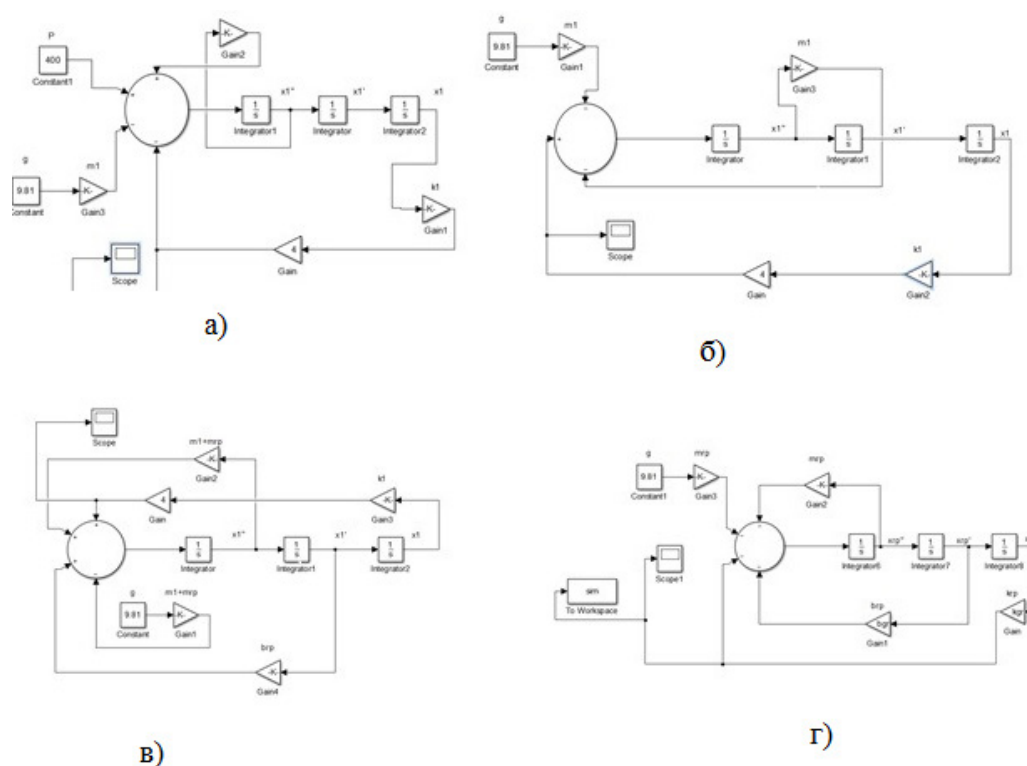


Рисунок 3 – Аналоговые расчетные схемы, построенные в подпрограмме Simulink:
а – первая фаза движения; б – вторая фаза движения;
в – третья фаза движения; г – четвертая фаза движения

Figure 3 – Analog calculation schemes built in the Simulink subroutine:
a – the first phase of movement; b – the second phase of movement;
c – the third phase of movement; d – the fourth phase of movement

В тоже время движение присоединенной массы грунта можно описать как

$$-m_{\text{гр}} \cdot \ddot{x}_{\text{гр}} - k_{\text{гр}} \cdot x_{\text{гр}} - b_{\text{гр}} \cdot \dot{x}_{\text{гр}} = m_{\text{гр}} \cdot g,$$

при соблюдении условия $x_{\text{гр}} < x_1$.

В составленной выше модели приняты следующие обозначения: m_1 – масса уплотняющей плиты; g – ускорение свободного падения; P – сила, необходимая для поднятия трамбующей плиты и преодоления сопротивления сжатия ускорителей; k_1 – жесткость ускорителей; x_0 – нулевая координата (координата рамы машины); x_1 – координата максимального поднятия трамбующей плиты; $\dot{x}_1$ – скорость движения трамбующей плиты; $\ddot{x}_1$ – ускорение трамбующей плиты; $m_{\text{гр}}$ – присоединенная

масса грунта, принимаем $m_{\text{гр}} = \frac{1}{2} \cdot m_1$, в соответствии с рекомендациями⁶; $k_{\text{гр}}$ – упругость грунта; $b_{\text{гр}}$ – вязкость грунта; $x_{\text{гр}}$ – координата уровня грунта; $\dot{x}_{\text{гр}}$ – скорость перемещения грунта; $\ddot{x}_{\text{гр}}$ – ускорение перемещения грунта; $P_{\text{гр}}$ – реакция грунта.

Решение описанной выше модели осуществлялось с использованием программы Matlab 2015 в подпрограмме Simulink. Полученные расчетные схемы представлены на рисунке 3.

Данные расчетные схемы позволяют определить перемещения рабочей плиты и поверхности грунтового полупространства после удара во времени. Однако для сопоставления процессов, происходящих в грунте, интересно изменение напряженного состояния в последнем.

⁶ Альберт И.У. Теоретические основы динамических методов поверхностного уплотнения грунтов. М., 1974. 67 с.

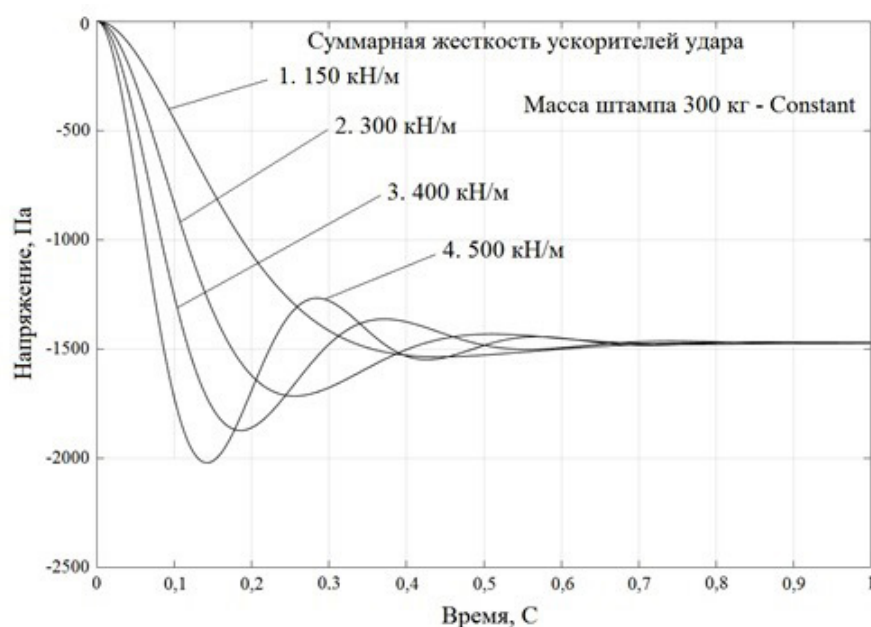


Рисунок 4 – Изменение напряженного состояния в грунте при применении различных по жесткости ускорителей удара

Figure 4 – Change in the stress condition in the soil when using shock accelerators of different stiffness

Зная сопротивление упруго-вязких сил в грунте $P_{гр}$, при неизменной площади поверхности жесткого штампа, легко перейти к контактным напряжениям σ_0 . Поэтому задачей исследования является определение максимального значения остаточных напряжений при изменении таких параметров, как масса ударной части m_1 и жесткости пружинного ускорителя k_1 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет изменения напряженно-деформационного состояния грунтового полупространства осуществлялся применительно к конструкции прицепной трамбовки, навешиваемой на трактор третьего тягового класса [8]. В качестве управляемых параметров выбраны: масса ударной части m_1 , которая изменялась в диапазоне от 150 до 500 кг, и жесткость ускорителя удара k_1 , изменяемая в диапазоне от 150 до 500 кН/м. При этом площадь рабочего органа составляла $S=1 \text{ м}^2$, при ширине $B=0,8 \text{ м}$. Проверка работоспособности модели проводилась для легкого суглинка со следующими характеристиками: вязкость $b_{гр} = 212 \text{ кПа·с}$ и жесткость $k_{гр} = 300 \text{ кН/м}$.

В результате проведенного вычислительно-эксперимента была получена зависимость изменения напряженного состояния грунта во

времени при различных жесткостях пружинного ускорителя удара и постоянной массе ударного штампа (рисунок 4). Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении жесткости пружин ускорителя растет импульс удара

При этом сокращается время нарастания пиковых значений напряжений в грунтовом полупространстве. Максимальные пиковые напряжения при жесткости ускорителей удара в 150 кН/м появляются через 0,5 с, в то время как при жесткости в 500 кН/м – через 0,15 с. Очевидно это связано с возросшей скоростью удара по сравнению со свободным падением штампа. В дальнейшем, при отрыве штампа от поверхности грунта, происходит спад напряжений с их стабилизацией через 0,7 с.

Естественно, на формирование напряженного состояния в грунтовом полупространстве основное влияние оказывают параметры ударного штампа (рисунок 5).

В этом случае пиковые значения напряжений проявляются через 0,2...0,3 с, со смещением в большую сторону как по абсолютному значению напряжений, так и по времени их проявления, при увеличении массы штампа. Очевидно этот эффект связан с большей инерционностью уплотняющего рабочего органа.

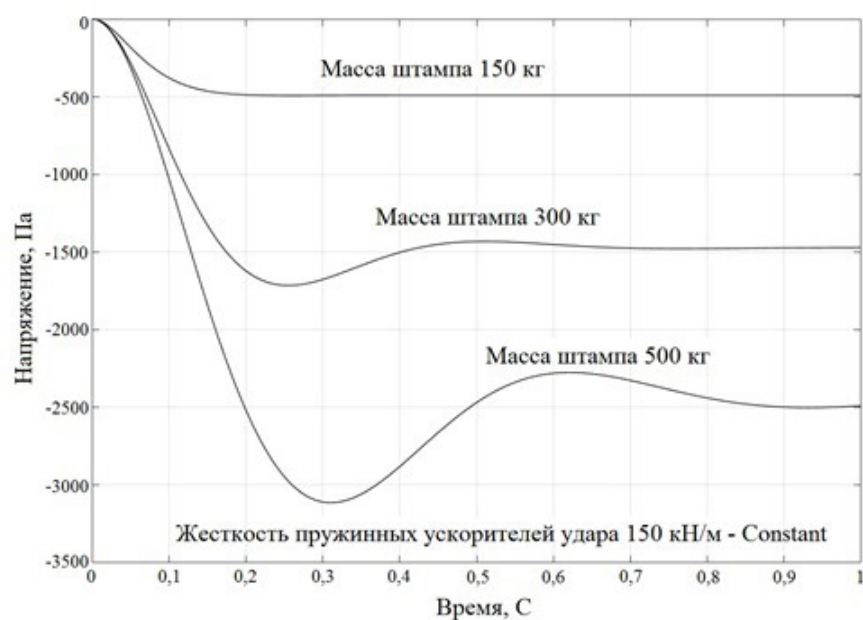


Рисунок 5 – Изменение напряженного состояния в грунте при изменении массы штампа

Figure 5 – Change in stress condition in the soil when changing the mass of the stamp

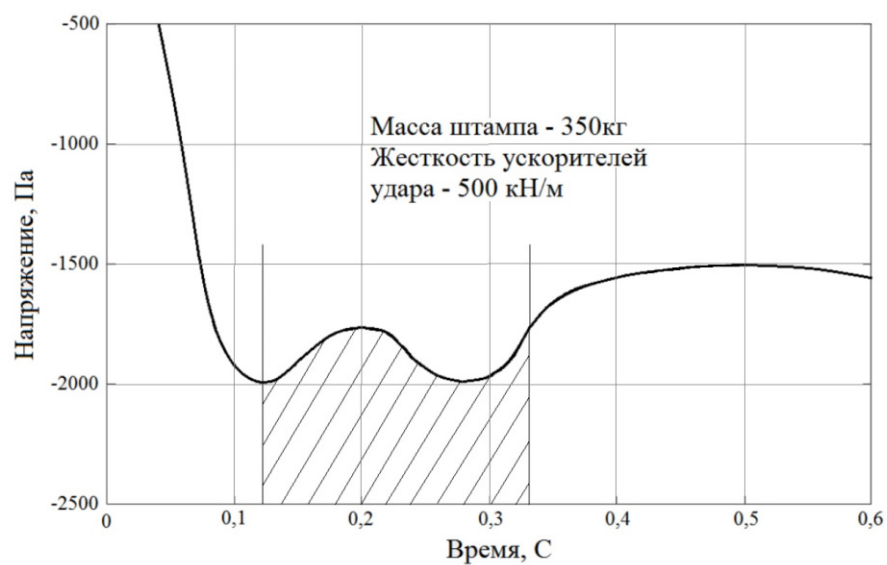


Рисунок 6 – Изменение напряженного состояния в грунте при использовании штампа с ускорителем удара

Figure 6 – Change in stress condition in the soil when using a stamp with a shock accelerator

При этом и время стабилизации напряжений наступает значительно позже – 0,9 с, при использовании штампа массой 500 кг.

Совместный анализ полученных зависимостей показывает, что при проектировании оборудования ударного действия, предназначенного для уплотнения грунтов естественного сложения, требуется обоснованный подход к выбору массы штампа и жесткости ускорителей удара. Так, для разработанной машины [8] с параметрами, указанными выше, целесообразно использовать массу ударной части в 350 кг при жесткости ускорителей удара в 500 кН/м. В этом случае и от штампа, и от импульса удара будут создаваться пиковые напряжения в 2000 Па, но наступление их будет растянуто по времени от 0,15 до 0,3 с (рисунок 6).

Такой процесс позволит быстрее сформировать уплотненное ядро в грунтовом полупространстве и потребует меньшего числа ударов по одному следу для получения требуемой плотности материала. При этом, как показывают исследования, представленные в работе [15, 16], увеличивается и глубина распространения напряжений.

Обычно машины ударного действия работают в частотном режиме, обеспечивающем нанесение следующего удара после полного затухания процессов, происходящих в массе грунта. Анализ полученных зависимостей показывает, что этот момент наступает примерно через 0,8...0,9 с. Таким образом, уплотняющая машина должна работать с частотами 60...100 ударов в минуту. Этот вывод хорошо согласуется с данными, полученными другими авторами [17, 18].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При строительстве скоростных магистралей необходимо повышать несущую способность не только конструктивных слоев дороги, но и оснований. Однако специализированное оборудование для этих целей отсутствует, а используемые технологии требуют больших затрат как по времени, так и по финансам. Повышение прочности и плотности грунтов оснований естественного сложения требует приложения к ним ударных нагрузок. Для этих целей нужна маневренная машина с повышенной энергией удара и осуществляющая работы в непрерывном цикле.

Интенсификация процесса уплотнения ударными нагрузками возможна только за счет увеличения массы штампа, высоты сбрасывания ударной плиты или за счет увеличения скорости удара. Применение первых двух спо-

собов в малогабаритной самоходной машине весьма затруднительно, а третий способ требует дополнительных устройств, одним из которых могут быть ускорители удара.

Предложенная модель трамбующего оборудования позволила рассмотреть процессы, происходящие в грунтовом полупространстве, получить сравнительные характеристики массы штампа и жесткости ускорителей удара. Полученные данные хорошо коррелируются с данными, полученными ранее другими авторами [17].

Однако при повышенных скоростях удара явно просматриваются волновые процессы, происходящие в грунте. Поэтому в дальнейшем необходимо изучить процесс нарастания коэффициента уплотнения с использованием волновых подходов [19] и оценить влияние параметров дополнительных устройств на процесс уплотнения. Кроме того, требует дополнительного изучения взаимное влияние двух штампов, работающих в противофазе.

Полученные результаты исследования могут быть полезны инженерным работникам, занимающимся разработкой новой техники интенсифицирующего действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Serridge C.J. Synac O. Ground Improvement Solutions for Motorway Widening Schemes and New Highway Embankment Construction Over Soft Ground. *Ground Improvement Journal*. 2007. Vol.11(4). pp. 219–228.
2. Karczewski J. Identification of Heavy Machines Impaction on Soil Using Ground Penetrating Radar. Karczewski J., Pysz P., Tomecka-Suchoń S., Akinniyi A., Uhl T. *Mechanisms and Machine Science*. 2019. Vol. 73. pp. 3741–3748.
3. Доценко А.И., Никитин Д.В. Пути повышения эффективности грунтоуплотняющих машин ударного действия // Вестник МАДИ. 2019. №3 (58). С. 27–31.
4. Дьяконов П.Ю., Болтунов В.А., Потапов А.Д. Применение тяжелых трамбовок при возведении насыпей в транспортном строительстве // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 97–99.
5. Летуниев С.Б., Савенков А.В. Анализ использования грунтоуплотняющих машин при возведении земляного полотна // Сб. «Специальная техника и технологии транспорта Санкт-Петербурга». Петергоф, 2019. С. 88–92.
6. Халафов Н.М., Габиров Ф.Г., Амрахов А.Т. Утрамбовывание просадочных лессовых грунтов тяжелыми трамбовками и разработка новых конструкций // Строительство и архитектура. 2016. Т.4 № 1. С. 6–9.
7. Галдин Н.С. Рабочее оборудование ударного действия для уплотнения грунта трамбованием: монография [Электронный ресурс]: Н.С. Гал-

дин; СибАДИ, кафедра ПТТ-МиГ. Электрон. дан. Омск: СибАДИ, 2016. 104 с.

8. Чухарев Р.А., Чабуткин Е.К. Трамбовка ударного действия для уплотнения грунтов естественного сложения. Механизация и автоматизация строительства [Электронный ресурс]: сборник статей / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. С.7–12.

9. Костельов М.П., Хархута Н.Я. Определение основных параметров трамбующих машин для уплотнения грунтов // Строительные и дорожные машины. 1969. № 11. С. 11–14.

10. Тюрменов И.С., Разумов С.В., Доценко А.И. Методика расчета параметров и режимов работы двухмассных рабочих органов трамбующих машин // Известия вузов, Машиностроение. 2005. №2. С. 37–43.

11. Polyakov A.P. Dynamic powder compaction processes // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Iss.2. pp.42–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.

12. Галдин Н.С., Егорова Н.Н. Моделирование трамбующего рабочего органа // Вестник Воронежского гос.техн.ун-та. 2011. т.7. № 1. С. 49–52.

13. Абелев М.Ю., Романов Н.В., Коптева О.В. Уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 16–21.

14. Савельев С.В., Михеев В.В. Исследование деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении // Вестник СибАДИ. 2012. №4. С.100–103.

15. Тюрменов И.С., Разумов С.В. К вопросу о повышении эффективности рабочих органов трамбующих машин // Известия вузов. Строительство. 1999. № 10. С. 88–93.

16. Paulmichl I., Furpass J.: Mitteltiefe Verdichtung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis. Tagungsband der 7. Österreichische Geotechniktagung des Österreichischen Nationalkomitees der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) und des ÖIAV, Austria Center Vienna, 21. – 22. Jänner 2009.

17. Костельов М.П. Напряженное состояние грунта, уплотняемого ударными нагрузками // В сб. «Вопросы проектирования и сооружения земляного полотна автомобильных дорог». Тр.Союздорнии, вып. 37, Балашиха, 1970. С. 177–194.

18. Попов Г.Н., Разумов С.В., Травников К.К. Определение технологических параметров трамбующих машин в условиях эксплуатации // Строительные и дорожные машины. № 3. 1987. С. 16–17.

19. Попов Г.Н., Разумов С.В. Расчетная модель грунтоуплотняющих машин ударного действия. // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 8. С. 103–107.

REFERENCES

1. Serridge C.J. Synac O. Ground Improvement Solutions for Motorway Widening Schemes and New Highway Embankment Construction Over Soft Ground. *Ground Improvement Journal*. 2007; 11(4): 219-228.

2. Karczewski J. Identification of Heavy Machines Impact on Soil Using Ground Penetrating Radar. Karczewski J., Pysz P., Tomecka-Suchoń S., Akinniyi A., Uhl T. *Mechanisms and Machine Science*. 2019; 73: 3741–3748.

3. Docenko A.I., Nikitin D.V. Puti povysheniya effektivnosti gruntouplotniaushih mashin udarnogo deystvia. [Ways to improve the efficiency of impact compacting machines]. *Vestnik MADI*. 2019; 3(58): 27–31 (in Russian).

4. Diakonov P.U., Boltunov V.A., Potapov A.D. Primenenie tiagelyh trambovok pri vozvedenii nasypei v transportnom stroitelstve [The use of heavy tampers in the construction of embankments in transport construction]. *Vestnik MGSU*. 2009; 1: 97–99 (in Russian).

5. Letunin S.B., Savenkov A.V. Analiz ispolzovaniya gruntouplotniaushih masin pri vozvedenii zemliannogo polotna [Analysis of the use of soil compacting machines in the construction of subgrade]. *Sb.Spetsialnaya equipment and technology transport St. Petersburg, Peterhof*, 2019:88–92 (in Russian).

6. Halafov N.M., Gabirov F.G., Amrahov A.T. Utrambovyvanie prosadochnykh lessovykh gruntov tiagelymi trambovkami i razrabotka novykh konstruktsiy [Tamping subsidence forest soils with heavy rammers and the development of new designs.]. *Construction and Architecture*. 2016; 4 no1: 6–9 (in Russian).

7. Galdin N.S. *Rabochee oborudovanie udarnogo deistvia dlia uplotnenia grunta trambovaniem* [Working equipment of impact action for compaction of soil by ramming]. Omsk, 2016: 104 (in Russian).

8. Chukharev R.A., Chabutkin E.K. Trambovka udarnogodeistvia dlia uplotnenia gruntov estestvennogo slozenia. [Impact ramming for compaction of soils of natural composition]. *Mechanization and automation of construction. In the collection of articles*. Samara: Samar. state tech. University, 2019: 7–12 (in Russian).

9. Kosteliov M.P., Harhuta N.Ia. Opredelenie osnovnykh parametrov trambuyushih mashin dlia uplotnenia gruntov [Determination of the main parameters of tamping machines for soil compaction]. *Construction and road machines*. 1969; 11: 11–14 (in Russian).

10. Turemnov I.S., Razumov S.V., Docenko A.I. Metodika rascheta parametrov i regimov raboty dvuhmassnykh rabochih organov trambuushih mashin [Methodology for calculating the parameters and operating modes of two-mass working elements of tamping machines]. *University Proceedings, Mechanical Engineering*. 2005; 2: 37–43 (in Russian).

11. Polyakov A.P. Dynamic powder compaction processes. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018; 2: 42–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.

12. Galdin N.S., Egorova N.N. Modelirovanie trambuushchego rabochego organa. [Modeling tampering working body]. *Vestnik Voronezhskogo tekhnikal university*. 2011; Vol.7, no.1: 49–52 (in Russian).

13. Abelev M.U., Romanov N.V., Kopteva O.V. Uplotnenie gruntov tiazhelymi trambovkami [Compaction of soils with heavy tampers]. *Industrial and civil engineering*. 2018; 4: 16–21 (in Russian).

14. Saveliev S.V., Mikheev V.V. Issledovanie deformirovaniya uprugoviazkoi sredy pri udarnom nagruzhении. [Research Deformation of Elastik-viscous Medium Under Impact Loading]. *Vestnik SibADI*. 2012; 4: 100–103 (in Russian).

15. Turemnov I.S., Razumov S.V. K voprosu o povyshenii effektivnosti rabochih organov trambuschihi masin [On the issue of improving the efficiency of the working bodies of tamping machines]. *University News. Construction*, 1999, no. 10, pp. 88–93 (in Russian).

16. Paulmichl I., Furpass J.: Mitteltiefe Verdichtung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis. Tagungsband der 7. Österreichische Geotechniktagung des Österreichischen Nationalkomitees der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) und des ÖIAV, Austria Center Vienna, 21–22. Jänner 2009.

17. Kosteliov M.P. Napriazhennoe sostoianie grunta, uplotniaemogo udarnymi nagruzkami [The stress state of the soil, compacted by shock loads]. *Trudy Souzdomnii*. 1970; Iss.37, Balashiha; 177–194 (in Russian).

18. Popov G.N., Razumov S.V., Travnikov K.K. Opredelenie tehnologicheskikh parametrov trambuschihi mashin v usloviah ekspluatatsii [Determination of technological parameters of tamping machines in operating conditions]. *Construction and road machines*. 1987; 3: 16–17 (in Russian).

19. Popov G.N., Razumov S.V. Raschetnaia model gruntouplotniauschihi mashin udarnogo deistvia. [A design model of shock-tightening soil compacting machines]. *University News. Construction and architecture*. 1986; 8: 103–107 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Чухарев Роман Алексеевич – Написание статьи, разработка расчетной схемы и математической модели, участие в проведении вычислительного эксперимента и обработке полученных результатов.

Тарасова Наталья Евгеньевна – Оказание помощи в разработке математической модели, обработка полученных результатов, написание основного раздела работы.

Чабуткин Евгений Константинович – Общее руководство работой, корректировка содержательной части работы, формулирование результатов работы.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Roman A. Chukharev – Writing an article, developing a calculation scheme and a mathematical model, participating in a computational experiment and processing the results.

Natalia E. Tarasova – Assisting in the development of a mathematical model, processing the results, writing the main section of the work.

Evgenii K. Chabutkin – The general management of the work, correction of the content of the work, the formulation of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чухарев Роман Алексеевич – инженер, кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», (150023, Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: aryergard@yandex.ru).

Тарасова Наталья Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», ORCID 0000-0002-3782-6768 (150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: tarasovane@ystu.ru).

Чабуткин Евгений Константинович – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», ORCID 0000-0001-6979-410X (150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: chabutkin-ek@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Chukharev – Engineer, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YG TU), (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: aryergard@yandex.ru).

Natalia E. Tarasova – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YG TU), ORCID 0000-0002-3782-6768 (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: tarasovane@ystu.ru).

Evgenii K. Chabutkin – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YG TU), ORCID 0000-0001-6979-410X (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: chabutkin-ek@yandex.ru).

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

УДК 625.76.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-220-233>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ПАРКА НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

С.Ч. Монгуш,

ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет» (ТувГУ),

г. Кызыл, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с развитием жилищного и транспортного строительства в Республике Тыва прогнозируется недостаток мощности парка наземных транспортно-технологических машин. Состояние машин с течением времени изменяется и не в лучшую сторону. Работоспособность и производительность техники снижается, а затраты на проведение мероприятий по поддержанию ее в рабочем состоянии постоянно увеличиваются. Поэтому понятно стремление к безотказной работе машин и к увеличению продолжительности их использования. Каждое предприятие заинтересовано в эффективном применении имеющейся машинной техники, а в эксплуатационном – тем более, так как эффективность ее использования является целью работы такого предприятия.

Материалы и методы. Для улучшения работоспособности и увеличения производительности техники, уменьшения затрат на мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту ее в данной статье разработана методика оптимизации процесса формирования парка наземных транспортно-технологических машин в Республике Тыва по стратегическому плану развития строительства. Данная методика состоит из трех блоков – «Анализ регионального парка наземных транспортно-технологических машин», «Моделирование процессов обновления парка наземных транспортно-технологических машин» и «Исследование процессов обеспечения работоспособности парка наземных транспортно-технологических машин».

Результаты. Результатом моделирования является формулировка рекомендаций по обновлению парка наземных транспортно-технологических машин и по формированию системы обеспечения работоспособности парка наземных транспортно-технологических машин с учетом планируемого обновления.

Обсуждение и заключение. Получены расчетные соотношения для оценки убытков предприятий вследствие недостаточной укомплектованности наземными транспортно-технологическими машинами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наземные транспортно-технологические машины, работоспособность, укомплектованность, моделирование, техническое обслуживание, капитальный ремонт, оптимизация, коэффициент готовности, предприятие, обновление парка машин, эксплуатация.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор выражает благодарность рецензентам статьи.

Поступила 24.12.2019, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Монгуш С.Ч. Оптимизация процесса формирования регионального парка наземных транспортно-технологических машин. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 220-233. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-220-233>

© Монгуш С.Ч.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-220-233>

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF FORMING A REGIONAL EQUIPMENT FLEET OF GROUND TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

Syldys Mongush,

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“the Tuvan State University”,
Kyzyl, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Due to the development of building and transport construction in the Republic of Tuva, a lack of capacity of an equipment fleet of ground transportation and technological machines is predicted. The condition of cars changes eventually and not for the better. The operability and productivity of equipment decreases, and the costs of measures to maintain it in working condition are constantly increasing. Therefore, the desire for failure-free operation of machines and to increase the duration of its use is understandable. Each enterprise is interested in the efficient use of the current machinery, and operational - especially since the efficiency of its use is the goal of such an enterprise.

Materials and methods. To improve the working capacity and increase the productivity of the equipment, to reduce the costs of maintenance and repair activities a methodology of optimizing the process of forming an equipment fleet of ground transportation and technological machines in the Republic of Tuva has been developed in this article. The methodology consists of three blocks - “The analysis of a regional equipment fleet of ground transportation and technological machines”, “Modeling the processes of updating the equipment fleet of ground transportation and technological machines” and “Research on processes to ensure the operability of the equipment fleet of ground vehicles transport and technological machines”.

Results. The modeling result is the formulation of recommendations on updating the equipment fleet of ground transportation and technological machines and on the formation of a system for ensuring the operability of the equipment fleet of ground transportation and technological machines considering the planned update.

Discussion and conclusion. Estimated ratios are obtained for assessing the losses of enterprises due to insufficient equipment level of ground transport and technological machines.

KEYWORDS: ground transport and technological machines, operating capacity, equipment level, modeling, maintenance, major repair, optimization, operation ratio, enterprise, equipment fleet renewal, operation.

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses his gratitude to the reviewers of the article.

Submitted 24.12.2019, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Mongush S. Optimization of the process of forming a regional equipment fleet of ground transport and technological machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 220-233. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-220-233>

© Mongush S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Программа развития Республики Тыва (РТ)¹ предусматривает интенсивное развитие жилищного и транспортного строительства² [1], что подтверждается данными Тывастата. На рисунке 1 показана динамика роста общего жилого фонда с 2008 по 2017 г. Коэффициент динамики роста F представляет собой отношение общего жилого фонда в конкретный год к данному показателю 2008 г.

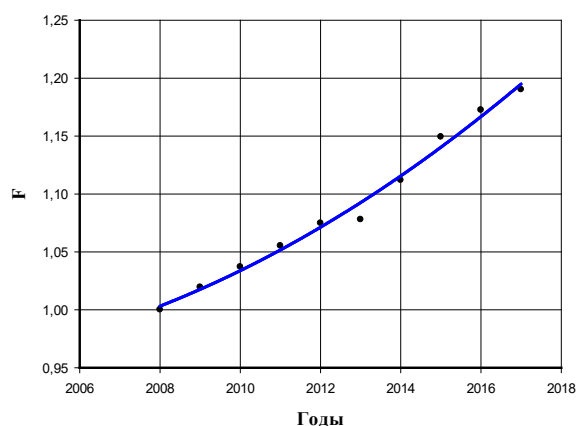


Рисунок 1 – Динамика роста общего жилого фонда

Figure 1 – Growth dynamics of total housing stock

Несмотря на положительную динамику в работе [2, 3] отмечено, что плановые показатели выше фактических примерно в полтора раза. К причинам такого отставания относятся:

- недостаточная мощность парка наземных транспортно-технологических машин (НТТМ);
- высокая степень изношенности (более 60 % машин с истекшим сроком службы) и простои машин, связанные с их неработоспособностью (до 40 % фонда рабочего времени);
- отсутствие координации работ между строительными предприятиями РТ;
- отсутствие оценки в потребности НТТМ по типам и размерному ряду;
- слабое развитие предприятий, осуществляющих техническое обслуживание и ремонт, вследствие ограничения инвестиций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для устранения этих причин была разрабо-

тана методика оптимизации процесса формирования парка НТТМ в РТ. Схема данной методики представлена на рисунке 2.

Основу методики составляют три блока [2, 4, 5]:

- анализ регионального парка НТТМ;
- моделирование процессов обновления парка НТТМ;
- исследование процессов обеспечения работоспособности парка НТТМ.

Основными результатами выполнения мероприятий, заложенных в первом блоке, являются итог сопоставления плановых объемов работ на предстоящий период с имеющимися мощностями парка НТТМ на текущий момент и результаты расчетов о необходимости наращивания мощности парка машин [6, 7].

Второй блок включает в себя четыре модели, описывающие процессы обновления парка машин. Необходимо отметить, что помимо приобретения новой техники в методике предусмотрена возможность покупки подержанных машин и машин после капитального ремонта. Это связано с тем, что, как показывает практика, объем финансирования, выделяемый на покупку новой техники, может составлять около 50 % от требуемого объема [2, 8]. Результатом моделирования, заложенного во втором блоке, является формулировка рекомендаций по обновлению парка НТТМ.

Третий блок направлен на формулировку рекомендаций по формированию системы обеспечения работоспособности парка НТТМ с учетом планируемого обновления. Существенная роль в мероприятиях данного блока отводится информационной автоматизированной системе управления технической эксплуатации.

При реализации процесса обновления парка НТТМ сопоставление различных вариантов должно проводиться с обеспечением минимума капитальных вложений Z , что описывается следующим соотношением [2, 3]:

$$Z = C_m \cdot X_{\text{пок}} + C_{\text{нн}i}(t) \cdot X_{\text{нн}} - \sum C_{\text{пр}i}(t) \cdot X_{\text{пр}i} + Z_{\text{кр}i}(t) \cdot X_{\text{кр}} - C_{\text{лик}i}(t) \cdot X_{\text{сп}} \rightarrow \min., \quad (1)$$

где i – возрастные группы НТТМ;

C_m – стоимость новой машины, руб.;

¹ Стратегия социально-экономического развития Республики Тыва до 2020 года. Одобрена постановлением Правительства Республики Тыва от 30 января 2012 г. № 28.

² Транспортная стратегия Республики Тыва до 2030 года. Утверждена постановлением Правительства Республики Тыва от 28 марта 2018 г. № 136.

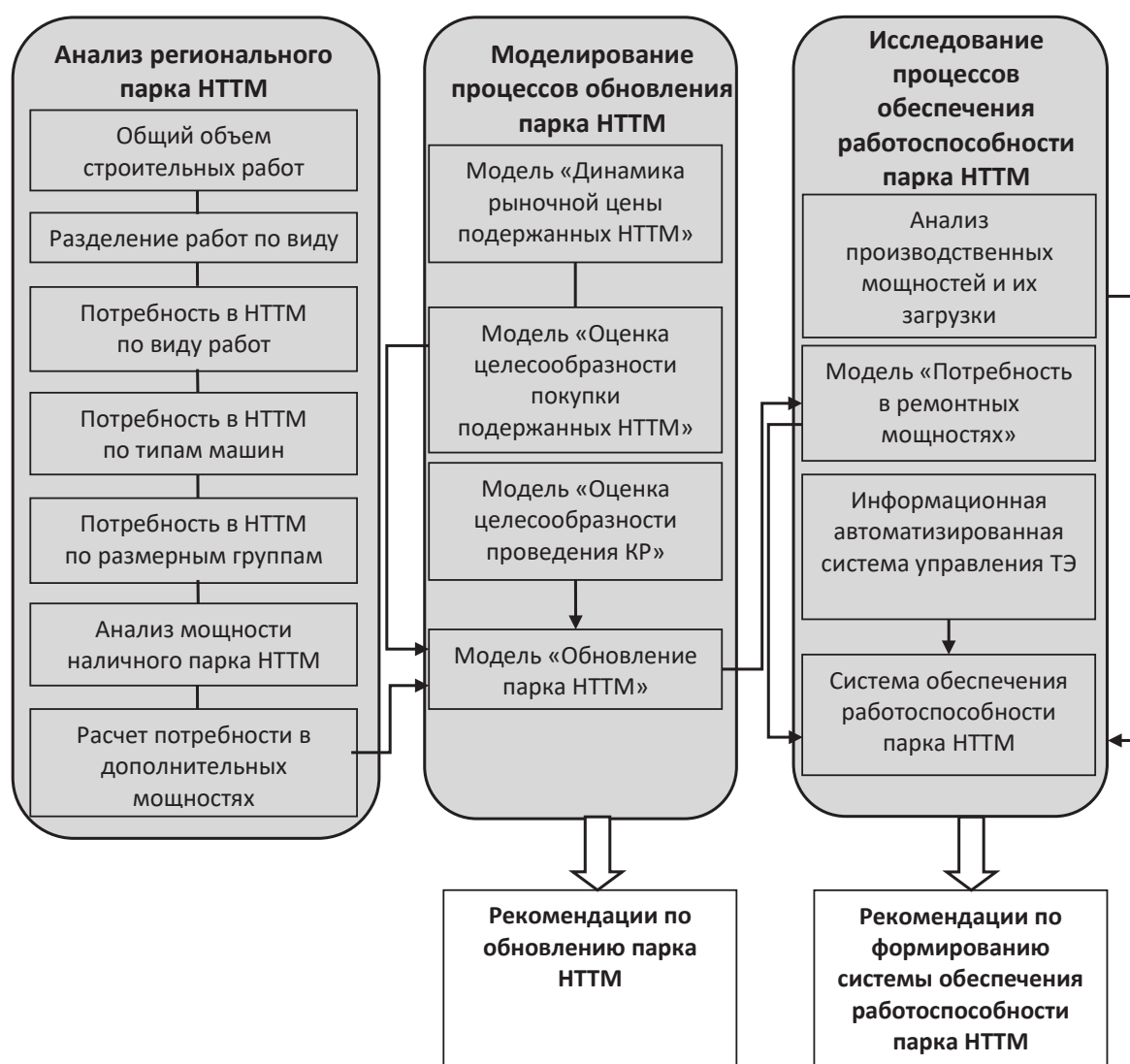


Рисунок 2 – Схема методики оптимизации процесса формирования парка наземных транспортно-технологических машин

Figure 2 – Diagram of a methodology for optimizing the process of forming a fleet equipment of ground transportation and technological machines

– стоимость машин разных возрастных групп, руб.;

– цена машин разных возрастных групп при их продаже, руб.;

– стоимость машин при их ликвидации, руб.;

– затраты на капитальный ремонт машин разных возрастных групп, руб.;

$X_{\text{пок}}$ – количество новых купленных машин;

$X_{\text{нн}}$ – количество машин, приобретенных на вторичном рынке;

– количество машин различных возрастных групп;

$X_{\text{кр}}$ – количество машин, находящихся в ремонте;

$X_{\text{сп}}$ – количество машин, предназначенных к списанию.

Разбиение парка машин на возрастные группы осуществляется с использованием коэффициента готовности (K_r), который характеризует техническое состояние как конкретной машины, так и всего парка. В процессе старения машин величина K_r изменяется по экспоненциальному закону [1]:

$$K_r(t) = \exp(-\beta_t \cdot t); t = 1, 2 \dots t_c, \quad (2)$$

где β_t – коэффициент, характеризующий скорость старения машин по наработке, мес.⁻¹, год.⁻¹;

t_c – продолжительность эксплуатации машин до момента их списания, месяцы, годы.

При формировании возрастных групп используются следующие исходные данные:

- минимальное значение коэффициента готовности K_{rmin} , определяющее возраст списания машины t_c ;

- шаг изменения ΔK или количество групп N .

Для разбиения парка НТТМ по возрастным группам непрерывная функция изменения $K_r(t)$ представляется в дискретном виде по интервалам времени эксплуатации t . Чаще используется прием разбиения с постоянным шагом ΔK по оси K_r (рисунок 3). При таком подходе в рамках одной возрастной группы оказываются машины с практически одинаковым техническим состоянием [9, 10].

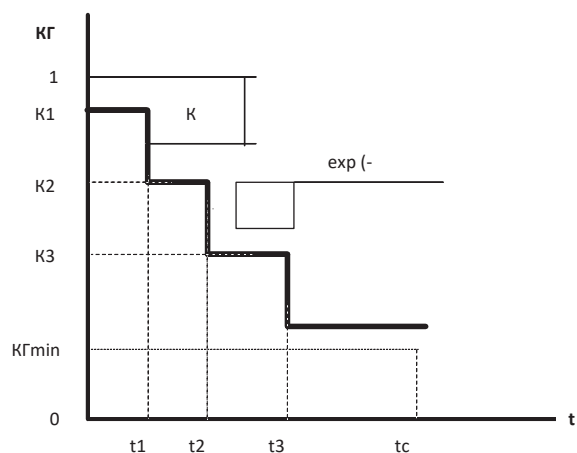


Рисунок 3 – Разбиение парка НТТМ на возрастные группы

Figure 3 – The subdivision of the ground transportation and technological machines (GTTM) equipment fleet into age groups

Количество возрастных групп N при заданном значении ΔK определяется из соотношения

$$N = \frac{1 - K_{rmin}}{\Delta K}. \quad (3)$$

Значение коэффициента готовности для i -й возрастной группы

$$K_{ri} = 1 - \frac{\Delta K}{2} - \Delta K \cdot (i - 1). \quad (4)$$

Временные границы для возрастных групп определяются из соотношения

$$t_i = \frac{-\ln(1 - i \cdot \Delta K)}{\beta_t}, \text{ мес.} \quad (5)$$

Далее будет представлено описание моделей, входящих во второй и третий блоки.

МОДЕЛЬ «ДИНАМИКА РЫНОЧНОЙ ЦЕНЫ ПОДЕРЖАННЫХ НТТМ»

Для анализа динамики изменения стоимости НТТМ была взята совокупная информация с различных сайтов продажи строительной техники для некоторых строительных машин. Регрессионный анализ показал, что для всех типов машин изменение розничной стоимости от их возраста достаточно хорошо описывается степенной зависимостью следующего вида:

$$K_m(t) = K_{m0} \cdot \exp(-\beta_c \cdot t), \quad (6)$$

где K_{m0} – стоимость новой машины, руб.;

β_c – коэффициент, определяющий динамику уменьшения цены с увеличением возраста машины – коэффициент старения по стоимости, мес.⁻¹, год.⁻¹;

t – возраст машины, месяцы, годы.

В таблице 1 приведены результаты регрессионного анализа.

Скорости изменения стоимостей для разных строительных машин отличаются друг от друга. Самое медленное обесценивание с возрастом характерно для экскаваторов и бульдозеров. Для них коэффициент β_c имеет минимальное значение, а срок службы – максимален. Наиболее быстрыми темпами теряет свою стоимость кран КС-35715 на базе шасси МАЗа, для которого коэффициент β_c максимален. На рисунках 4 и 5 представлены временные зависимости стоимостей экскаватора ЕК-12 и крана КС-35715.

Использование экспоненциальной зависимости для прогнозирования цены поддержанных машин не означает, что конечная их цена с течением длительного времени будет нулевой. Значение остаточной стоимости поддержанной техники не должно опускаться ниже стоимости металлолома и годных ее деталей, что по статистике составляет до 10 % от балансовой стоимости машины.

Таблица 1
Динамика уменьшения стоимости различных НТТМ; t, годы

Table 1
The dynamics of reducing the cost of various GTTM; t, years

Вид строительной техники	Стоимость машины, млн. руб.	Коэффициент корреляции
Кран КС-55713	$K_M(t) = 5,528 \cdot e^{-0,13 \cdot t}$	0,986
Бульдозер Komatsu D65	$K_M(t) = 10,906 \cdot e^{-0,13 \cdot t}$	0,979
Экскаватор JCB 3CX	$K_M(t) = 3,634 \cdot e^{-0,10 \cdot t}$	0,987
Экскаватор ЕК-12	$K_M(t) = 2,410 \cdot e^{-0,13 \cdot t}$	0,981
Экскаватор ЭО-5126	$K_M(t) = 5,341 \cdot e^{-0,22 \cdot t}$	0,96
Кран КС-35715 на базе шасси МАЗа	$K_M(t) = 5,167 \cdot e^{-0,36 \cdot t}$	0,957
Бульдозер Б10 (ЧТЗ 10т)	$K_M(t) = 4,647 \cdot e^{-0,012 \cdot t}$	0,980

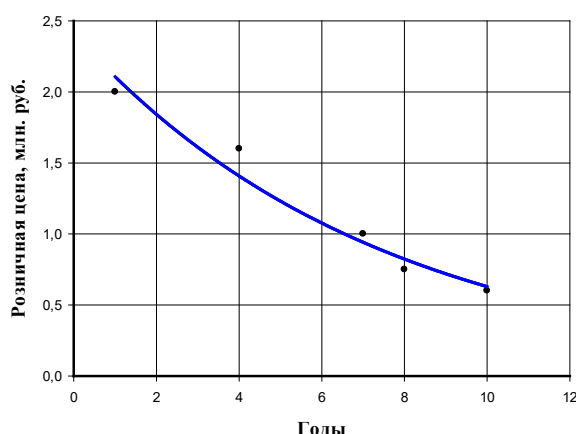


Рисунок 4 – Временная зависимость стоимости экскаватора ЕК-12

Figure 4 – Time dependence of the cost of the excavator EK-12

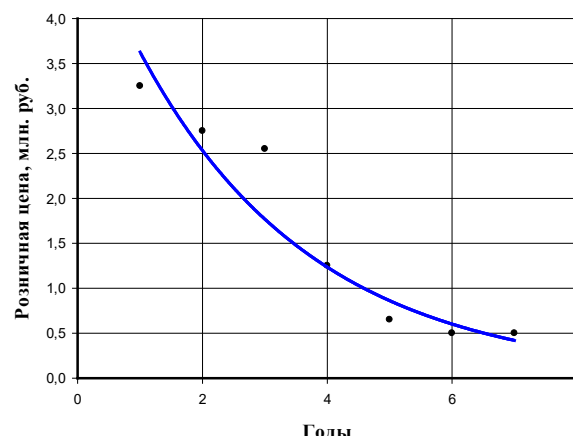


Рисунок 5 – Временная зависимость стоимости крана КС-35715

Figure 5 – Time dependence of the cost of the crane KC-35715

МОДЕЛЬ «ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОКУПКИ ПОДДЕРЖАННЫХ НТТМ»

Целесообразность приобретения подержанной машины оценивается через себестоимость машино-часа работы $C_{мч}$, которая в упрощенном виде определяется по соотношению³ [11, 12]:

$$C_{мч_i}(t) = \sum_i \{ [A_i(t) + A_{кр_i}(t) + 3_i + Z_{ПЭБ_i} + Z_{ВС_i} + H_i + Z_{пр}] + [Z_{ГСМ_i}(t) + Z_{ТОР_i}(t) + Z_{пер_i}] \}, \quad (7)$$

где i – номер единицы НТТМ в парке;

$A_i(t)$ – амортизационные отчисления на обновление парка НТТМ;

$A_{кр_i}(t)$ – амортизационные отчисления на КР;

3_i – зарплата операторов машин;

$Z_{ПЭБ_i}$ – затраты на содержание производственно-эксплуатационной базы;

$Z_{ВС_i}$ – отчисления в вышестоящую организацию, учредителям и т.п.;

H_i – налоги;

³System For Providing Fuel Efficiency Information Of Construction Machinery. United States Patent. Patent No.: US 9.446.769 B2. Date of Patent: Sep. 20. 2016.

$Z_{пр}$ – прочие отчисления (страховка, проценты по кредитам, лизинговые платежи, платежи за разрешения, техосмотры и пр.);

$Z_{ГСМ_i}(t)$ – затраты на ГСМ и рабочие жидкости;

$Z_{ТОиР_i}(t)$ – затраты на ТОиР, в том числе на запасные части и детали, которые быстро изнашиваются;

$Z_{пер_i}$ – затраты на перебазировку техники.

Первое слагаемое в формуле (7), стоящее в квадратных скобках, представляет собой условно-постоянные затраты $Z_{пост}(t)$. Эти затраты не зависят от количества отработанных машино-часов за расчетный период. Но существует зависимость $Z_{пост}(t)$ от возраста машин. Второе слагаемое в квадратных скобках формулы (7) является переменными затратами $Z_{пер}(t)$. Они возрастают пропорционально отработанным машино-часам.

Оценка целесообразности покупки поддержанных НТТМ осуществляется путем сопоставления эксплуатационных показателей новой и аналогичной покупаемой поддержанной машины. Для последней важны срок эксплуатации до покупки и экономическая целесообразность проведения КР [13, 14, 15, 16].

Последовательность расчета эксплуатационных показателей новой машины, то есть эксплуатируемой на предприятии с момента покупки, представлена в таблице 2.

Таблица 2
Эксплуатационные показатели новой машины за месяц

Table 2
Operational characteristics of a new machine for a month

Показатель	Формула
Эксплуатационные затраты, руб. в мес.	$Z_э(t) = Z_{э0} \cdot \exp(\beta_z \cdot t)$
Амортизационные отчисления, руб. в мес.	$A = K_{м0} \cdot \frac{E_H}{12}$
Условно-постоянные затраты, руб. в мес.	$Z_{пост} = A + 3$
Фактические затраты, руб. в мес.	$Z_ф(t) = Z_э(t) + Z_{пост}$
Коэффициент готовности за месяц	$K_r(t) = \exp(-\beta_t \cdot t)$
Наработка за текущий месяц, маш.-час.	$T(t) = T1 \cdot K_r(t)$
Месячная выручка, руб.	$B(t) = T(t) \cdot Ц_{мч}$
Прибыль за месяц, руб.	$P(t) = B(t) - Z_ф(t)$
Себестоимость машино-часа, руб.	$C_{мч}(t) = \frac{Z_ф(t)}{T(t)}$
Прибыль за машино-час, руб.	$P_{мч}(t) = Ц_{мч} - C_{мч}(t)$
Уровень рентабельности машино-часа работы	$R_{мч}(t) = \frac{P_{мч}(t)}{C_{мч}(t)}$

В таблице 2 приняты следующие обозначения:

$E_H = 0,12$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

3 – зарплата оператора машины, руб.;

β_t и β_z – коэффициенты, описывающие динамику изменений по наработке и затратам, соответственно, мес.⁻¹;

$Z_{э0}$ – эксплуатационные затраты новой машины, руб. в мес.;

T1 – наработка машины за первый месяц, машино-час.;

$Ц_{мч}$ – цена машино-часа, руб.

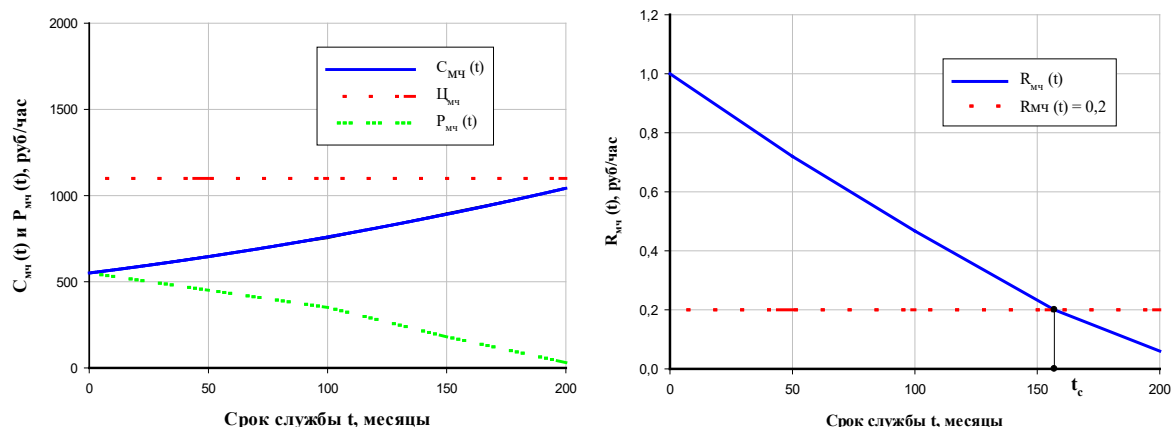


Рисунок 6 – Экономические показатели эксплуатации и срок службы экскаватора ЭО-4124

Figure 6 – Economic operational characteristics and excavator service life ЭО-4124

Уровень рентабельности машино-часа работы НТТМ может быть использован в качестве критерия экономической целесообразности при определении срока службы машины. Как видно из таблицы 2, рентабельность и прибыль определяются разностью между ценой $\Pi_{мч}$ и себестоимостью $C_{мч}(t)$ машино-часа. Для расчета экономических показателей с использованием соотношений, приведенных в таблице 2, была разработана программа в пакете MathCAD. На рисунке 6, а представлены результаты расчета экономических показателей экскаватора ЭО-4124 (по данным [17]). Рисунок 6, б поясняет процедуру определения срока службы машины по минимальному уровню рентабельности 20 %.

По величине расчетного срока службы t_c экскаватора ЭО-4124, который в данном случае составил 157 мес., определяется (соотношение $K_r(t)$ в таблице 2) величина минимального значения коэффициента готовности $K_{rmin} = 0,73$, то есть в рамках одного расчета происходит увязывание экономических и технических характеристик НТТМ [16, 18]. Расчетное минимальное значение коэффициента готовности определяет предельное состояние

машины и показывает экономическую нецелесообразность ее дальнейшей эксплуатации. Поэтому по мере достижения K_{rmin} должен решаться вопрос о проведении капитального ремонта [19] или о списании машины [20].

Экономические показатели не новой машины определяются по тем же соотношениям, что и для новой машины (см. таблицу 2). Но при этом должны учитываться срок ее эксплуатации на момент покупки и соответствующая этому сроку стоимость машины⁴. Возможны отличия в коэффициентах β_t и β_z .

Сопоставление двух вариантов решения о покупке машины (новой и не новой) может проводиться по оптимальному сроку службы, для определения которого лучше использовать удельные затраты за машино-час $Z_{уд}$ (отнесенные к единице продукции), вычисляемые из соотношения [10]:

$$Z_{уд} = C + E_n \cdot K_{уд}, \quad (8)$$

где C – себестоимость единицы продукции, руб./ед. прод.;

$K_{уд}$ – удельные капитальные затраты, руб./ед. прод.

⁴ МДС 81–3.99 Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств. – М: Госстрой России. Введены в действие с 01.01.2000. 52 с.

На рисунке 7 показаны временные зависимости удельных затрат двух вариантов приобретения машин $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ [10].

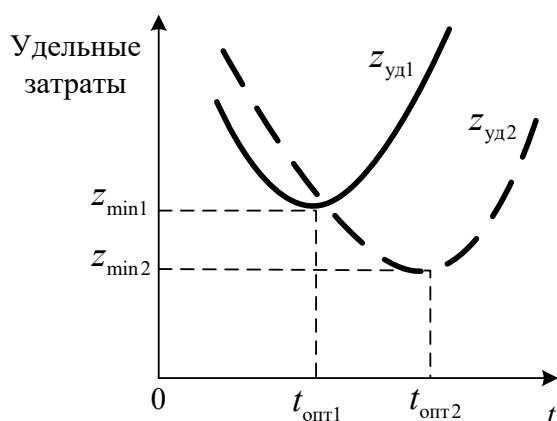


Рисунок 7 – Временные зависимости удельных затрат

Figure 7 – Time dependencies of unit costs

Минимум функции $Z(t)$ определяет оптимальный срок службы НТТМ. В данном случае предпочтение должно быть отдано второму варианту, обеспечивающему больший срок эксплуатации и меньшие затраты.

МОДЕЛЬ «ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА»

Капитальный ремонт представляет собой один из вариантов обновления парка НТТМ [2]. Целесообразность проведения КР должна быть оценена с экономической точки зрения. Модель «Оценка целесообразности проведения капитального ремонта» основана на сопоставлении изменений коэффициентов готовности $K_r(t)$ и «старения» по рыночной цене $K_m(t)$ в ходе эксплуатации, учитывающих затраты на проведение КР и его результаты.

Результатом проведения капитального ремонта является степень восстановления работоспособности машины $K_{кр}$. Изменение во времени данного показателя описывается следующим соотношением:

$$K_{кр}(t) = \exp(-\beta_{кр} \cdot t), \quad (9)$$

где $\beta_{кр}$ – коэффициент, определяющий динамику уменьшения $K_{кр}$ после капитальных ремонтов.

Если степень восстановления работоспособности в результате КР превышает отношение стоимости КР ($S_{кр}$) к стоимости новой машины $K_{м0}$, то его проведение является целесообразным с экономической точки зрения. То есть

$$K_{кр} \geq K_{СКР} = \frac{S_{кр}}{K_{м0}}. \quad (10)$$

На рисунке 8 проиллюстрирована процедура оценки целесообразности капитального ремонта.

Определяющими в данной процедуре являются зависимости $K_{кр}(t)$, $K_r(t)$ и $K_m(t)$. В качестве исходных данных используются значения коэффициентов β_c , β_t , $\beta_{кр}$, минимальное значение коэффициента готовности $K_{гmin}$, степень восстановления работоспособности машины после первого КР ($K_{кр1}$) и отношения $K_{СКР}$ для разных КР. Для конкретизации в рассматриваемом варианте приняты: $\beta_c = 0,12 \text{ мес}^{-1}$; $\beta_t = 0,25 \text{ мес}^{-1}$; $\beta_{кр} = 0,5 \text{ мес}^{-1}$; $K_{гmin} = 0,65$; $K_{кр1} = 0,85$; $K_{СКР1} = 0,6$ (здесь и далее цифры в индексе соответствуют номеру КР); $K_{СКР2} = 0,5$; $K_{СКР3} = 0,5$.

Время проведения КР определяется моментом достижения коэффициентом готовности своего минимального значения $K_{гmin}$. Степень восстановления работоспособности в результате проведения первого капитального ремонта КР1 (момент времени $t_{кр1}$) определяется величиной ΔK_r , соответствующей интервалу между линиями $K_{кр}(t)$ и $K_r(t)$, то есть $K_r(t_{кр1}) = K_{гmin} + \Delta K_r$. Это соответствует «омоложению» НТТМ на величину $\Delta t_{восст}$, что позволяет продолжать эксплуатацию машины до момента времени $t_{кр2}$.

Скачок ΔK_m определяется величиной $K_{СКР}$. Разность в интенсивностях старения НТТМ по техническому состоянию и рыночной стоимости машины (β_t и β_c) приводит к получению выгоды, в качестве которой выступает дополнительный срок службы Δt . Положительная величина Δt (как показано на рисунке 8) говорит об экономической целесообразности КР.

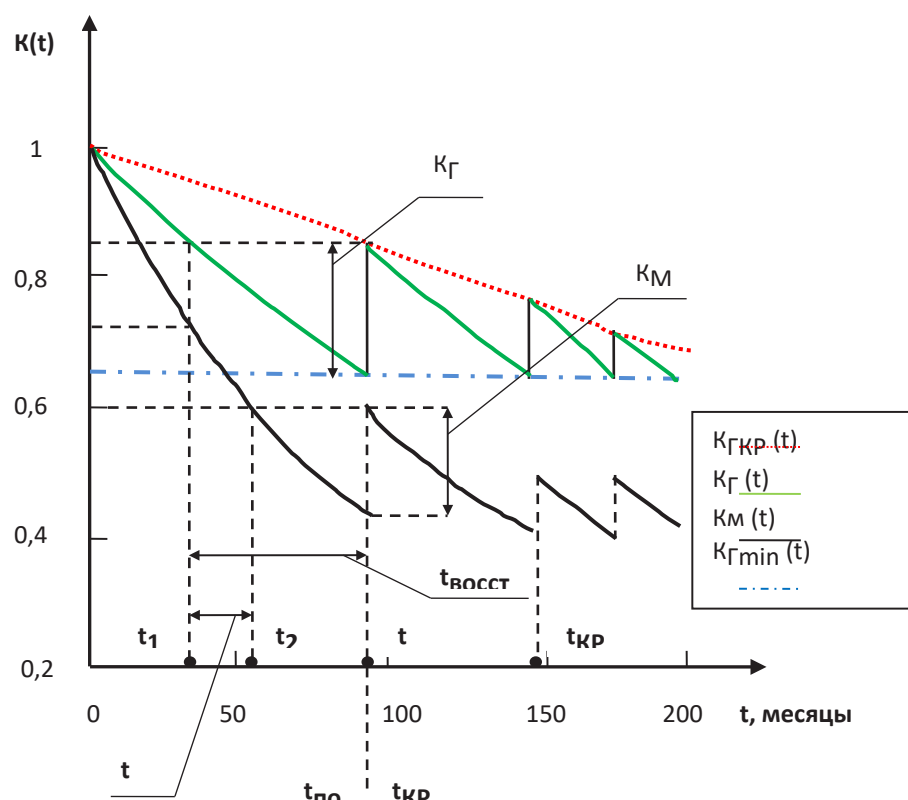


Рисунок 8 – К оценке целесообразности проведения КР

Figure 8 – On the assessment of the feasibility of a major repair (MR)

МОДЕЛЬ «ОБНОВЛЕНИЕ ПАРКА НТТМ»

Обновление парка НТТМ возможно путем использования следующих направлений [12, 21]:

- покупка новых отечественных или импортных машин;
- покупка машин, бывших в эксплуатации;
- проведение капитального ремонта собственной техники;
- продажа устаревших машин;
- списание техники, израсходовавшей свой ресурс;
- покупка не новой машины с последующим проведением КР;
- покупка не новой машины с последующим проведением КР для последующей ее продажи.

Как видим, большинство из данных вариантов попадают в рамки методик, описанных ранее. Исключение составляют два последних направления.

Выгодность покупки не новой машины с последующим проведением КР заключается

в следующем. Машина покупается в момент времени $t_{\text{пок}}$ по цене $K_M(t_{\text{пок}})$ (см. рисунок 8). Проводится капитальный ремонт, который обеспечивает возможность эксплуатации машины в течение времени $\Delta t_{\text{восст}}$. После этого машина продается по цене покупки. Условно-постоянные затраты владения машиной равняются стоимости КР. Полученная величина Δt получается практически бесплатным приращением срока службы.

Покупка не новой машины с проведением КР для ее последующей продажи связана с возможностью получения дополнительной прибыли, которая может быть использована для приобретения новой техники. Данное положение проиллюстрировано на рисунке 8. В момент времени t_3 покупается машина по стоимости $K_M(t_3)$. В проведение капитального ремонта вкладываются средства в размере $K_M(t_3 - t_2)$, после этого машина продается по цене $K_M(t_1)$. Величина прибыли составляет $K_M(t_2 - t_1)$.

Для горнодобывающих и строительно-дорожных предприятий чрезвычайно важен вопрос технической эксплуатации, используемой НТТМ. Эксплуатация зависит от степени надежности агрегатов машин и отдельных узлов. Надежность обеспечивается проведением их технического контроля. Это связано с материальными затратами, иногда очень значительными, так как стоимость запчастей для экскаваторов достаточно велика.

Для оптимизации процесса технического контроля важно знать и учитывать его многочисленные особенности, касающиеся разных вопросов, от природных, климатических факторов до технической компетенции и добросовестности персонала. Сегодня используют различные подходы для улучшения мониторинга технического состояния НТТМ.

Для обеспечения работоспособности и надежности техники применяют в основном планово-предупредительный ремонт – ППР. Для специализированной техники такой процесс достаточно сложен в части планирования и коррекции работ, трудоемок по расчету, и не всегда эффективен, что связано с системой организации обслуживания.

Вместо ППР целесообразнее применять непрерывный мониторинг надежности и работоспособности агрегатов машин и отдельных узлов, назвав его мониторингом системы ремонта. Такая система позволяет проводить непрерывный контроль техники, используя диагностические средства (различные датчики – температурные, вибрационные и др.).

Использование мониторинговой системы имеет преимущества, так как позволяет уменьшить трудоемкость диагностики, повысить ее надежность и точность. Кроме того, увеличится надежность соединений, так как будут исключены операции разъединения проводов, установки и подключения соответствующих датчиков. В результате применения системы повысится уровень безопасности и надежности эксплуатации техники, что скажется на технико-экономических параметрах НТТМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика оптимизации процесса формирования парка НТТМ в Республике Тыва, состоящая из трех блоков – «Анализ регионального парка НТТМ», «Моделирование процессов обновления парка НТТМ» и

«Исследование процессов обеспечения работоспособности парка НТТМ». Результатом моделирования, заложенного во втором блоке, является формулировка рекомендаций по обновлению парка НТТМ. Третий блок направлен на формулировку рекомендаций по созданию системы обеспечения работоспособности парка НТТМ с учетом планируемого обновления.

2. Описана процедура разбиения парка машин на возрастные группы, которая осуществляется с использованием коэффициента готовности, характеризующего техническое состояние конкретной машины, так всего парка НТТМ.

3. Получены расчетные соотношения для описания процесса изменения рыночной стоимости некоторых видов НТТМ. Данные соотношения составляют основу методики «Динамика рыночной цены поддержанных НТТМ», входящей во второй блок методики «Оптимизации процесса формирования парка НТТМ».

4. Описана модель «Оценка целесообразности покупки поддержанных НТТМ», основанная на использовании себестоимости машино-часа работы. Данная модель представляет собой одно из направлений формирования парка НТТМ. Сопоставление двух вариантов решения о покупке машины (новой и не новой) может проводиться по оптимальному сроку службы, для определения которого предложено использовать удельные затраты за машино-час.

5. Приведено описание модели «Оценка целесообразности проведения капитального ремонта», которая основана на сопоставлении изменений коэффициентов готовности и «старения» по рыночной цене в ходе эксплуатации, учитывающих затраты на проведение капитального ремонта и его результаты.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные расчетные соотношения для оценки убытков предприятий вследствие недостаточной укомплектованности НТТМ можно применять в строительных организациях и предприятиях Республики Тыва. И при оптимизации периодичности проведения ТОиР технических систем в качестве критерия можно использовать вероятность безотказной работы единиц НТТМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Монгуш С.Ч., Евтюков С.А. Анализ проблем эксплуатации строительной техники в Республике Тыва // Вестник ТувГУ. Технические и физико-математические науки. Кызыл, 2018. Вып. III (38). С.84–89.
2. Репин С.В., Ховалыг Н-Д.К., Монгуш С.Ч. Оптимизация состава парка строительных машин на примере Республики Тыва // Технология колесных и гусеничных машин. Обзорно-аналитический и научно-технический журнал. 2015. №4(20). С. 56–64.
3. Чооду О.А. Развитие систем планово-предупредительного ремонта горных и транспортно-технологических машин // Вестник ТувГУ. Технические и физико-математические науки. Кызыл, 2019. № 3 (42). С. 37–49.
4. Винник А.И., Макаренко Н.Г., Шаргаев А.А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта бронетанкового вооружения и техники // Вестник СибАДИ. 2016. № 4 (50). С. 7–13.
5. Чооду О.А. Эксплуатация горных транспортно-технологических машин на месторождениях полезных ископаемых на территории РТ // Вестник ТувГУ. Технические и физико-математические науки. Кызыл, 2014. № 3 (22). С.92–102.
6. Лапина Н.В. Исследование стойкости полимерных материалов, используемых при ремонте дорожно-строительных машин, к воздействию повышенных температур // Вестник МАДИ (Государственного технического университета). 2018. Выпуск 3 (54). С.50–54.
7. Салихов Р.Ф., Чудова Т.М., Валиев Р.Р. Повышение надежности строительных и дорожных машин путем совершенствования системы измерения наработки // Вестник СибАДИ. 2016. № 2 (48). С. 25–31.
8. Bhagavath Venkatesh Technical Efficiency Measurement by Data Envelopment Analysis: An Application in Transportation // Alliance Journal of Business Research. [Электронный ресурс]. URL: <http://ajbr.org/archives.htm>. (дата обращения 01.12.2018).
9. Zhukov I.A., Dvornikov L.T. New constructive solutions of anvil-blocks of percussion mining machines // North Charleston: Create Space. 2015.130 p.
10. Саая С-С.Ш., Шавыраа Ч.Д., Куулар О.О. Анализ производительности автосамосвалов Тувинской горнорудной компании // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 12 (107). С.181–184.
11. Репин С.В., Бакланова Т.В., Монгуш С.Ч. Экономические критерии функционирования парка строительных машин // Вестник ТувГУ. Технические и физико-математические науки. 2016. Вып. III (31). С. 114–121.
12. Ховалыг Н-Д.К. Разработка критериев целесообразности покупки машин со сроком эксплу-

атации // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 243–245.

13. Абалаков А.Д., Шеховцов А.И., Лысанова Г.И., Новикова Л.С. Особенности проявления неблагоприятных природных процессов на территории Республики Тыва // Успехи современного естествознания. 2016. № 6. С. 132–137.

14. Шавыраа Ч.Д., Куулар О.О. Выбор технологических решений технического обслуживания и текущего ремонта автобусов г. Кызыла // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 2. С.31–35.

15. Манакоев А.Л., Кирпичников А.Ю., Тюнюкова Т.К. Анализ направлений совершенствования технической эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов // Вестник ИрГТУ. 2015. №5 (100). С. 127–131.

16. Плавельский Е.П. Путь становления и дальнейшего развития технического регулирования как составной части управления качеством продукции машиностроения на примере подъемно-транспортных, строительных, дорожных, горных машин и спецавтотранспортных средств // Строительные и дорожные машины. 2019. № 3. С. 3–14.

17. Чооду О.А., Евтюков С.А. Основные причины отказов горных машин на территории Республики Тыва // Вестник ТувГУ. Технические и физико-математические науки. 2017. №3. С. 13–19.

18. Куулар О.О., Шавыраа Ч.Д. Применение экскаватора ЭКГ-5И в горнодобывающей промышленности Республики Тыва // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып.6. С. 179–184.

19. Кутузов В.В., Максименко А.Н., Макацария Д.Ю. Организация эксплуатации строительных и дорожных машин с учетом их технического состояния // Вестник Белорусско-Российского университета. 2006. № 4 (13). С. 28–31.

20. Сандан Н.Т., Евтюков С.А., Монгуш С.Ч. Влияние морального износа на сроки службы машин // Успехи современной науки. 2017. Том 1, № 12. С.114–118.

21. Максимов С.Е., Репин С.В., Зазыкин А.В., Чечуев В.Е. Анализ рынка дорожно-строительных машин в России и эволюция потребительских качеств этих машин // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 3–12.

REFERENCES

1. Mongush S.CH., Yevtyukov S.A. Analiz problem ekspluatatsii stroitel'noy tekhniki v Respublike Tyva [analysis of problems of construction equipment operation in the Republic of Tyva]. *Vestnik TuvGU. Tekhnicheskkiye i fiziko-matematicheskkiye nauki*. Kyzyl, 2018; Vyp. III (38): 84-89. (in Russian)
2. Repin S.V., Khovalyg N-D.K., Mongush S.CH. Optimizatsiya sostava parka stroitel'nykh mashin

na primere Respubliki Tyva [Optimization of the composition of the fleet of construction machines on the example of the Republic of Tuva]. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin. Obzorno-analiticheskiy i nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. 2015; 4(20): 56-64. (in Russian)

3. Choodu O.A., Mongush S.CH. *Razvitiye sistem obsluzhivaniya gornyykh i dorozhno-stroitel'nykh mashin* [Development of maintenance systems for mining and road-building machines]. Kyzyl: RIO TuvGU, 2018: 115. (in Russian)

4. Vinnik A.I., Makarenko N.G., Shargayev A.A. Sovershenstvovaniye sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki [Improvement of the system of maintenance and repair of armoured weapons and equipment]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4 (50): 7-13. (in Russian)

5. Choodu O.A. Ekspluatatsiya gornyykh transportno-tekhnologicheskikh mashin na mestorozhdeniyakh poleznykh iskopayemykh na territorii RT [Operation of mining transport and processing machines at mineral deposits in the territory of the Republic of Tuva]. *Vestnik TuvGU. Tekhnicheskiye i fiziko-matematicheskiye nauki*. Kyzyl, 2014; 3 (22): 92-102. (in Russian)

6. Lapina N.V. issledovaniye stoykosti polimernyykh materialov, ispol'zuyemykh pri remonte dorozhno-stroitel'nykh mashin, k vozdeystviyu povyshennykh temperatur [Study of resistance of polymer materials used in repair of road construction machines to high temperatures]. *Vestnik MADI (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2018; 3 (54): 50-54. (in Russian)

7. Salikhov R.F., Chudova T.M., Valiyev R.R. Povysheniye nadezhnosti stroitel'nykh i dorozhnykh mashin putem sovershenstvovaniya sistemy izmereniya narabotki [Improving the reliability of construction and road machines by improving the system of measurement of operating time]. *Vestnik SibADI*. 2016; 2 (48): 25-31. (in Russian)

8. Bhagavath, Venkatesh. Technical Efficiency Measurement by Data Envelopment Analysis: An Application in Transportation. *Alliance Journal of Business Research*. Available at: <http://ajbr.org/archives.htm>. (accessed 01.12.2018).

9. Zhukov I.A., Dvornikov L.T. New constructive solutions of anvil-blocks of percussion mining machines. North Charleston: Create Space. 2015: 130.

10. Saaya S.-S.SH., Shavyraa CH.D., Kuular O.O. Analiz proizvoditel'nosti avtosamosvalov Tuvinskoy gornorudnoy kompanii [Performance analysis of dump trucks of the Tuva mining company]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017; 12 (107):181-184. (in Russian)

11. Repin S.V., Baklanova T.V., Mongush S.CH. Ekonomicheskiye kriterii funktsionirovaniya parka stroitel'nykh mashin [Economic criteria for the

functioning of the construction machinery fleet]. *Vestnik TuvGU. Tekhnicheskiye i fiziko-matematicheskiye nauki*. 2016; III (31):114-121. (in Russian)

12. Khovalyg N.-D.K. Razrabotka kriteriyev tselesoobraznosti pokupki mashin so srokom ekspluatatsii [Development of criteria of expediency of purchase of machines with service life]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012; 2: 243-245. (in Russian)

13. Abalakov A.D., Shekhovtsov A.I., Lysanova G.I., Novikova L.S. Osobennosti proyavleniya neblagopriyatnykh prirodnykh protsessov na territorii Respubliki Tyva [Features of the manifestation of adverse natural processes in the Republic of Tuva]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2016; 6:132-137. (in Russian)

14. Shavyraa CH.D., Kuular O.O. Vybor tekhnologicheskikh resheniy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i tekushchego remonta avtobusov g. Kyzyl [Selection of technological solutions for maintenance and routine repair of buses in Kyzyl]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2018; 2: 31-35. (in Russian)

15. Manakov A.L., Kirpichnikov A.YU., Tyunyukova T.K. Analiz napravleniy sovershenstvovaniya tekhnicheskoy ekspluatatsii transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov [Analysis of the areas of improvement of technical operation of transport and technological machines and complexes]. *Vestnik IrGTU*. 2015; 5 (100): 127-131. (in Russian)

16. Plavel'skiy Ye.P. Put' stanovleniya i dal'neyshego razvitiya tekhnicheskogo regulirovaniya kak sostavnoy chasti upravleniya kachestvom produktsii mashinostroyeniya na primere pod'yemno-transportnykh, stroitel'nykh, dorozhnykh, gornyykh mashin i spetsavtotransportnykh sredstv [The way of formation and further development of technical regulation as an integral part of quality management of mechanical engineering products on the example of lifting-transport, construction, road, mining machines and special motor vehicles]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*. 2019; 3: 3-14. (in Russian)

17. Choodu O.A., Yevtyukov S.A. Osnovnyye prichiny otkazov gornyykh mashin na territorii Respubliki Tyva. [The main causes of failures of mining machines in the territory of the Republic of Tuva]. *Vestnik TuvGU. Tekhnicheskiye i fiziko-matematicheskiye nauki*. 2017; 3: 13-19. (in Russian)

18. Kuular O.O., Shavyraa CH.D. Primeneniye ekskavatora EKG-5I v gornodobyvayushchey promyshlennosti Respubliki Tyva [The use of the excavator EKG-5I in mining industry of the Republic of Tuva]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2017; 6: 179-184. (in Russian)

19. Kutuzov V.V., Maksimenko A.N., Makatsariya D.YU. Organizatsiya ekspluatatsii stroitel'nykh i

dorozhnykh mashin s uchetom ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Organization of operation of construction and road machines considering their technical condition]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2006; 4 (13): 28-31. (in Russian)

20. Sandan N.T., Yevtyukov S.A., Mongush S.CH. Vliyaniye moral'nogo iznosa na sroki sluzhby mashin [The impact of obsolescence on machine life]. *Uspekhi sovremennoy nauki*. 2017; 1, № 12: 114-118. (in Russian)

21. Maksimov S.Ye., Repin S.V., Zazykin A.V., Chechuyev V.Ye. Analiz rynka dorozhno-stroitel'nykh mashin v Rossii i evolyutsiya potrebitel'skikh kachestv etikh mashin [Market analysis of road-building machines in Russia and the evolution of consumer qualities of these machines]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*. 2019; 7: 3-12. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Монгуш Сылдыс Чамбааевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические средства» ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет» ORCID: 0000-0001-9402-6065. (667000, Россия, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36. e-mail: syldys-mongush@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Syldys Mongush – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Transport and Technological Facilities Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Tuva State University", ORCID: 0000-0001-9402-6065 (667000, Russia, the Republic of Tuva, Kyzyl, 36, Lenin St., e-mail: syldys-mongush@yandex.ru).

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГРУЗОВ В ГОРОДЕ

Л.С. Трофимова
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сделан акцент на развитие автомобильного транспорта РФ, которое характеризуется увеличением объемов перевозок, выполняемых специализированным подвижным составом различных типоразмеров, изменением расположения грузообразующих и грузопоглощающих пунктов, требованиями Заказчиков к количественным и качественным показателям, установленным в договорах. Эти условия способствуют развитию экономики РФ в социально-значимых отраслях. Целью исследования является разработка методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров автотранспортного предприятия для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе.

Материалы и методы. Методика текущего планирования разработана в рамках новой концепции, представляющей собой синтез методов теории грузовых автомобильных перевозок, теории технического обслуживания и текущего ремонта подвижного состава. В исследованиях применяется системный анализ, методы теории вероятностей и математической статистики.

Результаты:

– методологические основы, позволившие разработать методику текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров автотранспортного предприятия для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе;

– программа для ЭВМ, применение которой в практике работы автотранспортного предприятия позволит выполнять планирование, направленное на выполнение условий договоров и получение прибыли.

Обсуждение и заключение. Реализация и апробация методики текущего планирования при перевозке грузов в городе выполняется в условиях работы автотранспортного предприятия г. Омска с использованием программы для ЭВМ «Планирование работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе». Применение методики позволило автотранспортному предприятию получить прибыль на 14,5% больше, чем прибыль, которая могла быть получена при использовании в планировании ранее существующих методик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автотранспортное предприятие, специализированный подвижной состав, перевозка грузов в городе, методика планирования.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор благодарит за поддержку научных исследований коллектив кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте», «Эксплуатация и ремонт автомобилей» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Поступила 06.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Трофимова Л.С. Методика текущего планирования работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе. Вестник СибАДИ. 2020; 17(2): 234-247. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

© Трофимова Л.С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

THE METHODOLOGY OF THE CURRENT PLANNING OF A MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE OPERATION FOR THE TRANSPORTATION OF GOODS IN THE CITY

Liudmila S. Trofimova

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”,
Omsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. The emphasis is placed on the development of road transport in the Russian Federation, which is characterized by an increase in traffic carried out by specialized rolling stock of various sizes, a change in the location of cargo-forming and cargo-absorbing points, and the requirements of customers for quantitative and qualitative indicators established in agreements. These conditions ensure to the development of the Russian economy in social significant branches. The purpose of the study is to develop a methodology for the current planning of the operation of specialized rolling stock of standard sizes of a motor transport enterprise to implement the conditions of contracts for the transportation of goods in the city.

Materials and methods. The current planning methodology has been developed as part of a new concept, which is a synthesis of the methods of the theory of road freight transport, the theory of maintenance and current repair of rolling stock. A system analysis, the methods of probability theory and mathematical statistics are used in the studies.

Results:

- the methodological foundations that made it possible to develop a methodology for the current planning of the work of a specialized rolling stock of standard sizes for a motor transport enterprise to implement the contracts conditions for the transportation of goods in the city;

- a computer program, the use of which in the operating of a motor transport enterprise will make possible to carry out planning aimed to implement the contracts terms and make a profit.

Discussion and conclusions. The implementation and testing of the current planning methodology for the transportation of goods in the city is carried out in the conditions of a motor transport enterprise in the city of Omsk using a computer program “Planning the work of a motor transport enterprise for the transportation of goods in the city”. A methodology application allowed the motor transport enterprise to make a profit of 14.5% more than the profit that could be obtained by using previously existing methods in planning.

KEYWORDS: motor transport enterprise, specialized rolling stock, transportation of goods in the city, planning methodology.

ACKNOWLEDGEMENT. The author thanks the staff of the Department of Organization of Transport and Management in Transport, the Department of Automobile Repair and Maintenance, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, as well as the reviewers of the article for supporting in the scientific research.

Submitted 06.04.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Trofimova L.S. Methodology for the current planning of the motor transport enterprise operation for the transportation of the goods in the city. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 234-247. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

© Trofimova L.S.



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

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях автомобильный транспорт является одним из самых массовых и востребованных видов транспорта. Перевозка грузов обеспечивает деятельность всех отраслей экономики РФ. От выполнения условий договоров на перевозку грузов автотранспортными предприятиями (АТП) зависит деятельность социально-значимых отраслей экономики РФ. Условия договоров выполняются технически исправным подвижным составом, который осуществляет перевозки по установленным плановым показателям.

Автором настоящей статьи были выполнены исследования практики работы АТП, изучены Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта; Постановление Правительства РФ от 15.04.2011 N 272 (ред. от 31.01.2020) «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом»; Законы РФ; Приказы Министерства транспорта РФ; информация Федеральной службы государственной статистики. В период 2005–2017 гг. доля объема перевозок грузов, выполняемого предприятиями, увеличилась с 3,49% до 9,16%. На рынке автотранспортных услуг перевозку грузов выполняют крупные, средние, малые предприятия и предприниматели (физические лица). Установлено, что сегодня АТП представляет собой организацию в форме юридического лица, индивидуального предпринимателя, осуществляющую на территории РФ деятельность, связанную с эксплуатацией подвижного состава при перевозке грузов для получения прибыли; выполняющую обязанности по договору перевозки и поддержанию подвижного состава в технически исправном состоянии, независимо от того, является ли данная организация собственником этого подвижного состава или использует его на ином законном основании. Организационные структуры АТП претерпели изменения. На практике руководители АТП планируют показатели перевозок грузов, ТО и ТР подвижного состава для выполнения условий договоров и получения прибыли по опыту с учетом имеющихся уже сложившихся партнерских отношений с Заказчиками. В работе АТП происходит смещение акцентов на планирование перевозок грузов и выполнения ТО и ТР подвижного состава, а не на планирование применительно к отдельным службам и подразделениям.

В современных условиях руководители АТП стараются «приспособиться» под изменения

спроса на автотранспортные услуги, поэтому для перевозки грузов применяется подвижной состав, различный по типу кузова. Специалистами НИИАТа установлено, что сегодня на практике применяют 25% бортового подвижного состава и 75% специализированного подвижного состава, доля специализированного подвижного состава будет увеличиваться до 90–92%.

Современные условия работы АТП требуют разработки новых методологических основ, позволивших предложить методику планирования для практики работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП.

В современных условиях применяются методики для планирования работы АТП с учетом неравномерности производства [1, 2]. В исследовании [3] предлагается метод формирования структуры транспортного комплекса с учетом способа механизации и технологии, а также машин, используемых при уборке зерновых культур. При всех преимуществах предложенного метода он не может быть использован для текущего планирования работы АТП в городе.

Разработанные методики текущего планирования выполнения ТО и ТР подвижного состава [4, 5, 6, 7] не в полной мере учитывают особенности перевозок грузов, так как исследуется самостоятельная научная область или во взаимосвязи с транспортно-технологическими машинами [8]. В исследованиях особое внимание уделяется условиям эксплуатации подвижного состава [9]. Для разработки методик планирования учитывается влияние вероятностных факторов на результаты функционирования автотранспортных систем перевозок грузов [10, 11, 12, 13, 14, 15]. В работе предложена математическая модель в виде функциональной зависимости, учитывающей месяц, день недели и время суток при планировании перевозок [16]. В методике предложено применение регрессионных зависимостей влияния технико-эксплуатационных показателей на результаты функционирования автотранспортных систем перевозок грузов [17]. Однако методики оперативного планирования не могут быть реализованы в рамках текущего планирования. В исследованиях доказано, что сегодня необходимо учитывать влияние вероятностных факторов на развитие автомобильного транспорта и работу АТП [18, 19, 20].

Следует принимать выводы, сделанные в работе [21], о том, что особое внимание необходимо уделять балансу интересов в стремлении заказчика снизить затраты на автотранс-

портные услуги и в стремлении перевозчика к повышению доходности своего бизнеса за счет поиска и обоснованного сокращения резервов использования автомобильного транспорта. В работах [22, 23, 24] доказано, что методики должны быть реализованы с применением новых программ для ЭВМ, которые могут быть использованы в практике работы больших, средних и малых предприятий.

В ранее выполненных исследованиях не учитывались вероятностные показатели, формирующиеся в результате потребностей Заказчиков и определяющиеся в договорах. В работах [25, 26, 27] установлено, что длина ездки с грузом осуществляет взаимосвязь между перевозкой грузов и выполнением ТО и ТР подвижного состава в практике функционирования АТП. Исследования показали, что выработка и пробег каждой единицы подвижного состава планируются по длине ездки с грузом для каждого типоразмера подвижного состава [25, 26, 27]. Показатели ТО и ТР подвижного состава рассчитываются по периодичности ТО с учетом пробега, который планируется выполнить при перевозке грузов. Плановые показатели материально-технического обеспечения рассчитываются по показателям перевозки грузов и выполнения ТО и ТР подвижного состава, функционирующим во взаимосвязи. Исследование практики работы АТП показали, что сегодня для реализации строительных технологий требуются материалы, которые необходимо перевозить на специализированном подвижном составе из погрузочного пункта на периферии. В существующих методиках недостаточно проработаны взаимосвязи характеристик погрузочных пунктов с показателями функционирования специализированного подвижного состава типоразмеров АТП с учетом взаимосвязи перевозок грузов, ТО и ТР. Не учитываются возможности совершения арендных операций с подвижным составом в работе АТП. Необходимо продолжить и расширить исследования, так как их было недостаточно. В связи с этим можно утверждать, что тема настоящего исследования является актуальной.

Целью исследования является разработка методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- разработать алгоритм методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для

выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе;

- разработать программу для ЭВМ, позволившую выполнить реализацию методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП;

- определить социально-экономическую значимость практического применения разработанной методики.

Теоретическая значимость работы состоит в совершенствовании текущего планирования работы АТП при перевозке грузов в городе путем развития теории грузовых автомобильных перевозок и теории ТО и ТР подвижного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на основе синтеза методов теории грузовых автомобильных перевозок и теории ТО и ТР подвижного состава. Применяется анализ научной литературы, сделано исследование нормативно-технической литературы; правовых документов, законов РФ, приказов и распоряжений Министерства транспорта РФ. В исследовании используется системный анализ, позволяющий описать взаимосвязь функционирования перевозок грузов, ТО и ТР подвижного состава.

Алгоритм методики текущего планирования работы АТП представлен на рисунке 1.

Расчет показателей текущего планирования выполняется на основании данных (этап 1):

- информация в договорах (длина ездки с грузом; количество смен работы подвижного состава для выполнения условий договора на перевозку грузов в городе; объем груза, требуемый к перевозке на ветви погрузочного пункта для выполнения условий договора);

- информация о характеристиках погрузочного пункта (время работы погрузочного пункта по кварталам года; продолжительность погрузки на погрузочном пункте; количество грузовых постов на погрузочном пункте);

- информация о подвижном составе типоразмеров АТП (фактическая грузоподъемность каждой единицы подвижного состава определенного типоразмера при перевозке грузов на ветви погрузочного пункта для выполнения условий договора; фонд времени с учетом продолжительности работы погрузочного пункта; средняя техническая скорость, используемая для текущего планирования в АТП при перевозке грузов в городе; нулевые пробеги для выполнения условий договора

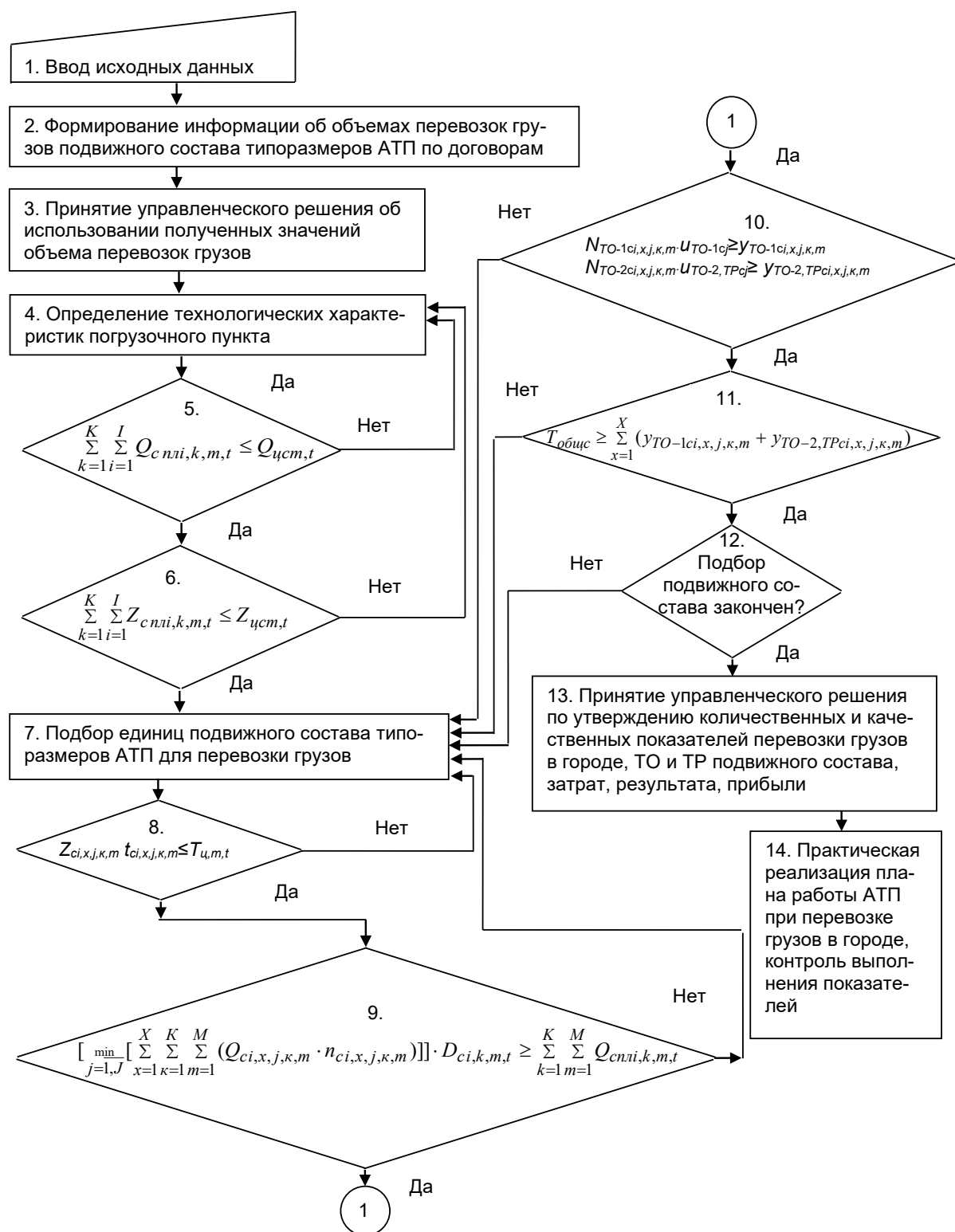


Рисунок 1 – Алгоритм методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров автотранспортного предприятия

Figure 1 – The algorithm of the methodology for the current planning of the specialized rolling stock of standard sizes of a motor transport enterprise

единицы подвижного состава определенного типоразмера на ветви погрузочного пункта; периодичность ТО-1, ТО-2; трудоемкость одного ТО-1, ТО-2 и текущего ремонта; норма расхода топлива на 100 км пробега);

– информация для расчета затрат (цена 1 л топлива; цена автомобиля балансовая; арендные платежи в случае аренды специализированного подвижного состава; стоимость 1 чел·ч работ по ТО-1, ТО-2 и ТР).

На основании данных о потребности в грузе формируется информация об объемах перевозок грузов специализированного подвижного состава типоразмеров АТП по договорам (этап 2) и принимается управленческое решение об использовании полученных значений в планировании (этап 3). На 2-м этапе применяется разработанная автором настоящей статьи методика и математическая модель определения объема перевозок грузов по договорам с учетом вероятностей выполнения транспортной работы специализированным подвижным составом типоразмеров АТП в городе [28]. Для решения проблемы применяются методы теории вероятностей и теорема Байеса, позволяющие определить объем перевозок грузов в городе по апостериорным вероятностям наступления событий через априорные вероятности и принятую гипотезу [28].

Этапы с 4-го по 12-й реализуются с применением разработанной автором настоящей статьи математической модели функционирования специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе.

В отличие от существующих методов планирования, в которых учитывались натуральные показатели и (или) затраты, в математической модели предусмотрена реализация цели деятельности АТП – выполнение условий договора и получение прибыли. Планируется результат и затраты [29]. Планирование результатов позволяет оценивать и выбирать эффективный способ организации работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП, тем самым обеспечивать выполнение условий договоров по рыночным тарифам на перевозку грузов и учитывать арендные платежи за подвижной состав для предпринимательской деятельности в общем эффекте, который максимизируется.

Математическая модель функционирования специализированного подвижного состава типоразмеров АТП позволяет выполнить проверку соответствия объема груза, который

может быть вывезен из погрузочного пункта в соответствии с его технологическими характеристиками объема груза, требуемого к перевозке по договору (1). Проверяется соответствие количества ездов с грузом на ветви погрузочного пункта количеству машинозездов, которое может обслужить погрузочный пункт (2), (этапы 4-й и 5-й).

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I Q_{cнлi,k,m,t} \leq Q_{цm,t}, \quad i = \overline{1, I};$$

$$t = \overline{0, 4}, \quad (1)$$

где $Q_{cнлi,k,m,t}$ – объем груза, требуемый к перевозке на k -й ветви m -го погрузочного пункта по i -му договору на t -м временном шаге расчета, т; $Q_{цm,t}$ – объем груза, который может быть вывезен из m -го погрузочного пункта в соответствии с его технологическими характеристиками на t -м временном шаге расчета, т.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I Z_{cнлi,k,m,t} \leq Z_{цm,t}, \quad i = \overline{1, I};$$

$$t = \overline{0, 4}, \quad (2)$$

где $Z_{cнлi,k,m,t}$ – количество ездов с грузом на k -й ветви m -го погрузочного пункта по i -му договору на t -м временном шаге расчета; $Z_{cнлi,k,m,t} = \text{int}(Z_{cнлi,k,m,t})$; $Z_{цm,t}$ – количество машинозездов, которое может обслужить m -ый погрузочный пункт на t -м временном шаге расчета, ед; $Z_{цm,t} = \text{int}(Z_{цm,t})$.

После проверки условия на этапе 6 выполняется переход на этап 7, который предполагает подбор единиц специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для вывоза груза из погрузочного пункта. На этапах с 8-го по 12-й проверяются следующие условия:

– общее время выполнения ездов каждой единицы специализированного подвижного состава определенного типоразмера по ветвям маршрута не превышает время работы, установленное для погрузочных пунктов (3), этап 8;

– выработка специализированного подвижного состава типоразмеров АТП соответствует спросу на перевозку грузов для выполнения условий конкретного договора (4), этап 9;

– общая трудоемкость выполнения работ по ТО-1, ТО-2 и ТР подвижного состава типоразмеров АТП соответствует трудоемкости, обеспечивающей безопасность перевозок грузов (5), этап 10;

– общая трудоемкость работ ремонтной базы АТП или специализированного предприятия больше, чем необходимо выполнить для подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в городе (6), этап 11.

$$Z_{ci,x,j,k,m} t_{ci,x,j,k,m} \leq T_{um,t}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}; \quad m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

где $Z_{cnni,k,m,t}$ – количество ездов с грузом на k -й ветви m -го погрузочного пункта по i -му договору на t -м временном шаге расчета; $t_{ci,x,j,k,m}$ – время оборота x -й единицы специализированного подвижного состава j -го типоразмера при перевозке грузов на k -й ветви m -го погрузочного пункта для выполнения условий i -го договора, ч; $T_{um,t}$ – время работы m -го погрузочного пункта на t -м временном шаге расчета, ч.

$$\left[\min_{j=\overline{1, J}} \left[\sum_{x=\overline{1, X}} \sum_{k=\overline{1, K}} \sum_{m=\overline{1, M}} (Q_{ci,x,j,k,m} \cdot n_{ci,x,j,k,m}) \right] \cdot D_{ci,t} \geq \sum_{k=\overline{1, K}} \sum_{m=\overline{1, M}} Q_{cnni,k,m,t}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (4)$$

где $Q_{ci,x,j,k,m}$ – выработка за смену x -й единицей специализированного подвижного состава j -го типоразмера при перевозке грузов на k -й ветви m -го погрузочного пункта для выполнения условий i -го договора, т; $n_{ci,x,j,k,m}$ – булева переменная назначения с учетом возможности применения x -й единицы специализированного подвижного состава j -го типоразмера при перевозке грузов на k -й ветви m -го погрузочного пункта для выполнения условий i -го договора, $n_{ci,x,j,k,m} = \overline{0, 1}$, $n_{ci,x,j,k,m} = \text{int}(n_{ci,x,j,k,m})$; $D_{ci,t}$ – планируемое количество смен работы специализированного подвижного состава для выполнения условий i -го договора на перевозку грузов в городе на t -м временном шаге расчета; $D_{ci,t} = \text{int}(D_{ci,t})$; $Q_{cnni,k,m,t}$ – объем груза, требуемый к перевозке на k -й ветви m -го погрузочного пункта по i -му договору на t -м временном шаге расчета, т.

$$n_{ci,x,j,k,m} = \begin{cases} 1, \text{ если } \begin{cases} (N_{TO-1ci,x,j,k,m} \cdot u_{TO-1cj}) \geq y_{TO-1ci,x,j,k,m}; \\ (N_{TO-2ci,x,j,k,m} \cdot u_{TO-2,TPcj}) \geq y_{TO-2,TPci,x,j,k,m}; \end{cases} \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

$$i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}; \quad m = \overline{1, M},$$

где $N_{TO-1ci,x,j,k,m}$, $N_{TO-2ci,x,j,k,m}$ – количество воздействий для x -й единицы специализированного подвижного состава j -го типоразмера, выполняющей условия i -го договора на k -й ветви m -го погрузочного пункта соответственно по ТО-1, ТО-2, ед.; $N_{TO-1ci,x,j,k,m} = \text{int}(N_{TO-1ci,x,j,k,m})$, $N_{TO-2ci,x,j,k,m} = \text{int}(N_{TO-2ci,x,j,k,m})$; u_{TO-1cj} , $u_{TO-2,TPcj}$ – трудоемкость одного воздействия для j -го типоразмера специализированного подвижного состава соответственно по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч; $y_{TO-1ci,x,j,k,m}$, $y_{TO-2,TPci,x,j,k,m}$ – необходимая трудоемкость для x -й единицы специализированного подвижного состава j -го типоразмера, выполняющей условия i -го договора на k -й ветви m -го погрузочного пункта соответственно по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч.

$$T_{общ} \geq \sum_{x=\overline{1, X}} (y_{TO-1ci,x,j,k,m} + y_{TO-2,TPci,x,j,k,m}), \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}; \quad m = \overline{1, M}; \quad (6)$$

где $T_{общ}$ – общая трудоемкость работ ремонтной базы АТП или специализированного предприятия для подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в городе, чел.·ч.

Этап 12. Если ограничения, представленные на этапах 8–11, выполняются, то подбор подвижного состава завершен и происходит переход на этап 13. В противном случае осуществляется переход на этап 7.

Этап 13. Принятие управленческого решения по утверждению количественных и качественных показателей перевозки грузов в городе, ТО и ТР подвижного состава, затрат, результата, прибыли.

Плановые показатели по перевозкам грузов в городе, ТО и ТР подвижного состава, затратам, результату и прибыли подвижного состава по типоразмерам и договорам за квартал и год утверждаются руководителем и доводятся до исполнителей.

Этап 14. Практическая реализация плана работы АТП при перевозке грузов в городе, контроль выполнения показателей.

Выполняется практическая реализация плана, принимаются управленческие решения по обеспечению выполнения условий договоров.

Теоретические исследования сопровождаются проведением эксперимента, который направлен непосредственно на регистрацию входных и выходных параметров, характеризующих процесс перевозки грузов, без вмешательства в эксперимент во время его проведения. Результаты эксперимента обрабатываются после его проведения.

Для планирования количества и трудоемкости работ по ТО-1 и ТО-2 определяется периодичность по наработке, соответствующая величине, при которой работы выполняются для обеспечения технически исправного состояния подвижного состава, соответствующего номинальному уровню или заданному технической документацией. При планировании трудоемкости учитывается контрольная и исполнительская части работ, которые при данном методе практически сливаются. Количество ТО зависит от величины пробега подвижного состава типоразмеров АТП, определяющегося в результате эксперимента. В исследовании применяется принцип систематизированной группировки разновидностей специализированного подвижного состава по типоразмерам АТП [26, 27, 28]

Для определения величин вероятностных показателей работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП результаты эксперимента обрабатываются методами математической статистики. Применение методов теории вероятностей и математической статистики направлены на изучение показателей перевозок грузов, которые подвержены влиянию факторов неопределенностей. Использование перечисленных методов позволит получить величины количественных и качественных показателей функционирования подвижного состава типоразмеров АТП по верхней границе доверительного интервала и по нижней границе

доверительного интервала с вероятностью 0,95. Для конструирования последовательности этапов, направленных на решение вариационных задач, используется прямой метод, позволяющий найти максимальное значение прибыли АТП при выполнении условий договоров на перевозку грузов. Значение истинности определенного логического высказывания в методике представляется как булева функция от множества событий. Для этого применяются методы булевой алгебры. Методы организации и контроля направлены на формирование и реализацию приказов и распоряжений, исходящих от управляющей системы перевозками грузов и ТО и ТР подвижного состава для выполнения количественных и качественных показателей работы АТП.

Применение современных методов и способов, а также математической модели и методики определения объема перевозок грузов, математической модели функционирования специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе позволило описать функционирование АТП при взаимосвязи перевозок грузов ТО и ТР подвижного состава, подтвердить выдвинутые гипотезы, разработать методику для определения количественных и качественных показателей текущего планирования работы АТП.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, поставленные в работе, выполнены в полном объеме. Разработана методика планирования количественных и качественных показателей специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров и получения прибыли. Научная новизна исследования представлена в виде:

- методологических основ, позволивших разработать методику текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе;
- алгоритма методики текущего планирования работы специализированного подвижного состава типоразмеров АТП для выполнения условий договоров при перевозке грузов в городе.

Практическая значимость результатов исследований заключается в создании программы для ЭВМ, применение которой в практике работы АТП позволит разработать план, направленный на выполнение условий договоров и получение прибыли.

Реализация и апробация методики текущего планирования при перевозке грузов в городе выполняется в условиях работы АТП г. Омска с применением программы для ЭВМ «Планирование работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612834. Правообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». Автор – Л.С. Трофимова. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2020 г.). Тип реализующей ЭВМ: IBM PC-совместимый персональный компьютер, язык программирования: C#, вид и версия операционной системы: Microsoft Windows 10.

Реализация и апробация методики выполнена в АТП г. Омска для специализированного подвижного состава, осуществляющего перевозку бетона следующих типоразмеров: Hino ranger (3,2м³, 7,68 т); Hino profia (5м³, 12 т); Nissan Diesel (5м³, 12 т); КамАЗ 53229R (6м³, 14,4 т); Mercedes-Benz Actros (7м³, 16,8 т); Volvo FM Truck (8м³, 19,2 т); MAN TGS 41.390 (9м³, 21,6 т).

Перевозка бетона в городе осуществлялась по договорам на строительные объекты – многоэтажные дома, гаражи, парковочные места, объекты индивидуальной застройки. Погрузочные пункты – два бетонных завода.

Программа «Планирование работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе» включает в себя модули «Ввод данных», «Полученные данные», «Данные по типоразмерам», «Погрузочные пункты».

Работа в программе для ЭВМ выполняется в модулях «Данные по типоразмерам» для реализации 1-го этапа методики. Для определения плановых показателей в программе для ЭВМ работа выполняется в модуле «Ввод данных». На четвертом этапе методики в модуле «Погрузочные пункты» были определены показатели работы погрузочных пунктов (бетонных заводов).

Работа программы для ЭВМ позволяет реализовать этапы с 5-го по 12-й, в которых подбирается специализированный подвижной состав типоразмеров АТП и определяются плановые показатели работы АТП. В выходных формах работы программы для ЭВМ рассчитываются плановые показатели специализированного подвижного состава типоразмеров АТП по договорам и кварталам. В модуле «Полученные данные» доступна информация о количестве единиц подвижного состава по типоразмерам и кварталам, количестве ТО-1 и ТО-2, трудоемкости ТО-1, ТО-2 и ТР подвижного состава.

Для определения влияния выполненных исследований на показатели перевозок грузов, ТО и ТР подвижного состава, затраты, результат и прибыль АТП были проанализированы величины, полученные при реализации и апробации разработанной методики. Сравнения показали, что значения выработки (т, т·км), пробега, трудоемкости ТО и ТР подвижного состава типоразмеров АТП, полученные при апробации, находятся между верхней и нижней границами значений выработки (т, т·км), пробега, трудоемкости ТО и ТР подвижного состава, спланированных с применением новых методологических основ текущего планирования работы АТП при перевозке грузов в городе.

Социальная значимость исследований заключается в выполнении условий договоров на перевозку грузов в городе для экономического развития Сибирского ФО применительно к отрасли «строительство комфортного социального жилья по доступным ценам (в городах)». Оценкой выполненных исследований является количество тонн перевезенного груза.

Установлено, что в практической деятельности АТП получена прибыль на 14,5% больше, чем прибыль, которая могла быть получена при использовании в планировании ранее существующих методик.

Использование «ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению» позволило установить «метрику эффективности» – «затраты времени». Целью метрики являлось определить «сколько проходит времени до момента, когда система ответит на определенное действие». Для определения времени отклика применялось отношение

времени получения плановых показателей при работе с моделями к времени завершения ввода команд. Время интерпретируется «Чем меньше, тем лучше». Метрика эффективности составила не более 3 мин. Применение программ для ЭВМ позволило снизить трудоемкость на составление текущего плана на 46 чел.·ч.

Основные выводы по результатам исследований:

1. Исследование практики работы предприятий автомобильного транспорта, научной, нормативной и правовой базы, действующей на территории РФ, позволили установить, что в современных условиях АТП представляет собой организацию в форме юридического лица, индивидуально-предпринимателя, осуществляющую на территории РФ деятельность, связанную с эксплуатацией подвижного состава при перевозке грузов для получения прибыли; выполняющую обязанности по договору перевозки и поддержанию подвижного состава в технически исправном состоянии, независимо от того, является ли данная организация собственником этого подвижного состава или использует его на ином законном основании. Планирование показателей с учетом взаимосвязи видов деятельности – перевозки грузов, ТО и ТР подвижного состава является на сегодня единственно обоснованным подходом, обеспечивающим выполнение условий договоров и получение прибыли АТП.

2. В связи со сложившейся структурой применения подвижного состава наиболее востребован сегодня специализированный подвижной состав с различным типом кузова и грузоподъемностью, осуществляющий перевозку грузов в городе. Отсутствие на практике методики текущего планирования, направленной на выполнение условий договоров и получение прибыли с учетом особенностей взаимосвязи функционирования перевозок грузов, ТО и ТР специализированного подвижного состава типоразмеров АТП вызвало необходимость проведения дополнительных исследований.

4. Разработаны методы текущего планирования работы АТП, теоретической основой которых является синтез теории грузовых автомобильных перевозок, теории ТО и ТР подвижного состава.

5. Применение методики в практике работы АТП позволяет определить выработку

в тоннах, тонно-километрах, пробег, количество и трудоемкость ТО и ТР специализированного подвижного состава типоразмеров АТП, затраты, результат и прибыль по кварталам и за год.

6. Разработана методика текущего планирования работы АТП при перевозке грузов в городе, позволяющая учитывать в практике работы АТП соответствие технологических характеристик погрузочного пункта условиям Заказчиков по объему груза, что обеспечит выбор погрузочного пункта для выполнения условий договоров. Разработанная методика позволяет выполнять условия договоров в оперативном режиме эксплуатации технически исправным подвижным составом.

7. Применение разработанной методики в практике работы АТП г. Омска и полученный социально-экономический эффект от ее реализации, который выражен в количестве груза для обеспечения деятельности отрасли «строительство комфортного социального жилья по доступным ценам (в городах)» и в получении прибыли АТП, подтверждает научную и практическую значимость выполненных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tyurin A., Stoianov A. Improving the mining enterprise productivity based on probabilistic nature of the solid minerals extraction and transportation // E3S Web of Conferences 105,01038. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501038>.
2. Shepelev V., Zverev L., Almetova Z., Shubenkova K., Shepeleva E. Optimization of interaction of automobile and railway transport at container terminals // Lecture Notes in Networks and Systems. 2019. № 68. P. 593-602. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12450-2_57.
3. Muzylyov D., Kravcov A., Karnayh M., Berezhnaja N., Kutiya O. Development of a methodology for choosing conditions of interaction between harvesting and transport complexes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 2(3). P. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65670>.
4. Börger A., Alfaro J., León, P. Use of the Lean Methodology to Reduce Truck Repair Time: A Case Study // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. 930. P. 655-665 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65670>.
5. Озорнин С.П., Тарасов И.А. Методики и результаты оценки эффективности эксплуатации грузовых автотранспортных средств в условиях холодного климата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018.

Том 22, №3 (134). С. 234–243 DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-234-243>.

6. Озорнин С.П. Единый технологический процесс использования транспортно-технологических машин – новая синергетическая парадигма их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. Том 22, №5 (136) 2018. С. 251–263. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-251-263>.

7. Ядрошникова Г.Г., Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О. Интегрированный логистический менеджмент на основе многокритериальной оценки технического состояния машин // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Том 22, №10 (141). С. 248–256. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-248-256>.

8. Buraev M., Ilyin P., Ilyin S., Shisteev A. and Anosova A. The calculation program of the technical service enterprise of transport-technological machines in agriculture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012019>

9. Zudov G.Y., Buslaeva I.I., Levin A.I. Operability of MAN F2000 // Trucks in the North International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). 2019. Vol. 188. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.75>.

10. Айтбагина Э.Р., Витвицкий Е.Е., Юрьева Н.И. Влияние расстояния перевозок грузов на производственную себестоимость в совокупности микроавтотранспортных систем при «инсорсинге» // Вестник СибАДИ. 2017. № 1(53). С. 135–143. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-43-50](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-43-50).

11. Крылова К.П., Витвицкий Е.Е. Влияние расстояния перевозок грузов на затраты по аренде группы автотранспортных средств в городах // Вестник СибАДИ. 2017. № 2(54). С. 175–181. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-29](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-29).

12. Витвицкий Е.Е., Федосеев Е.С. Влияние времени простоя при выполнении погрузочно-разгрузочных работ на функционирование совокупности микросистем при перевозке грузов автомобильным транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2017. № 3(55). С. 41–47. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-41-47](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-41-47).

13. Айтбагина Э.Р., Витвицкий Е.Е. Влияние расстояния на результаты работы группы автомобилей при перевозке грузов грузоотправителем // Вестник СибАДИ. 2017. № 56 (4-5(56-57)). С. 14–24. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-14-24](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-14-24).

14. Федосеев Е.С., Витвицкий Е.Е. Влияние времени простоя под погрузочно-разгрузочными работами на функционирование совокупности малых ненасыщенных систем перевозок

строительных грузов автомобильным транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2017. № 56 (4-5(56-57)). С. 47–61. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-47-61](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-47-61).

15. Tolebayeva A. Kh., Vitvitskiy E.E. and Markelova T.V. Enhancement of the efficiency of transportation of the company's own cargo in operational scheduling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012063>.

16. Печатнова Е.В. Математическое моделирование колебаний суточной интенсивности движения // Вестник СибАДИ. 2017. № 56(4-5(56-57)). С. 145–151. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-145-151](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-145-151).

17. Varakin V.V., Chebakova E.O. Influence of Technical and Operational Indicators on the Results of Planning Motor Transport Operation International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). 2019. Vol. 188. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.13>.

18. Janic M. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2007. 12 (1). P. 33–44. DOI: 10.1016/j.trd.2006.10.004

19. Глушкова Ю.О., Гордашников О.Ю., Пахомова А.В. Влияние фактора времени на транспортное обслуживание международной цепи поставки // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 23–29. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-23-29](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-23-29).

20. Wang R., Yang K., Yang L., Gao Z. Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. 72. P. 423–436. DOI: 10.1016/j.engappai.2018.04.022.

21. Курганов В.М., Мукаев В.Н., Грязнов М.В. Оптимизация затрат на автомобильные перевозки промышленного предприятия // Вестник СибАДИ. 2018. Том 15, № 5. С. 672–685. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-672-685>.

22. Темнов Э.С. Анализ некоторых подходов в современной практике транспортного моделирования // Вестник СибАДИ. 2018. № 15(5). С. 708–717. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-708-717>

23. Smirnov V.V., Semenov V.L., Kadyshchev E.N., Zakharova A.N. and Chainkov V.N. TQM/ISO at Russian enterprises IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012016>.

24. Fadeev A.I. The task of determining the matching of actual and planned operation plans in a dispatch control system of the road transport // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012021>

25. Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Структура методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия // Вестник СибАДИ. 2017. №6(58). С. 71–78. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71).

26. Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Том 22, №4. С. 243–252. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71).

27. Trofimova L.S. System planning the motor transport enterprise functioning in freighting in interurban communication // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632. 012039. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012039.

28. Trofimova L.S. Fuzzy Set Theory for Planning the Operation of a Motor Transport Enterprise // Advances in Intelligent Systems and Computing, VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. 2019. Vol. 2. Vol. 1116 (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_62.

29. Трофимова Л.С., Касимова А.Б. Обзор теории планирования численности работников грузовых автотранспортных предприятий // Вестник СибАДИ. 2017. № 1(53). С. 89–96. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-89-96](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-89-96).

REFERENCES

1. Tyurin A., Stoianov A. Improving the mining enterprise productivity based on probabilistic nature of the solid minerals extraction and transportation. *E3S Web of Conferences* 105,01038. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501038>.

2. Shepelev V., Zverev L., Almetova Z., Shubenkova K., Shepeleva E. Optimization of interaction of automobile and railway transport at container terminals. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019; 68: 593-602. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12450-2_57.

3. Muzylyov D., Kravcov A., Karnayh M., Berezhnaja N., Kutiya O. Development of a methodology for choosing conditions of interaction between harvesting and transport complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016; 2(3): 11-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65670>.

4. Borger A., Alfaro J., León, P. Use of the Lean Methodology to Reduce Truck Repair Time: A Case Study. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 930: 655-665 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65670>.

5. Ozornin S.P. Tarasov I.A. Metodiki i rezultati ocenki effektivnosti ekspluatatsii грузовых автотранспортных средств в условиях холодного климата [Methods and results of evaluation of efficiency of operation of freight vehicles in cold climate

conditions]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 22. №3 (134): 234-243 DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-234-243> (in Russian).

6. Ozornin S.P. Edinii tehnologicheskii process ispolzovaniya transportno_tehnologicheskikh mashin – novaya sinergeticheskaya paradigma ih ekspluatatsii [A single technological process of using transport-technological machines is a new synergistic paradigm of their maintenance]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 22, №5 (136): 251-263. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-251-263> (in Russian).

7. Yadroshnikova G.G., Shalamova O.A., Samoilov E.V., Jurkova E.O. Integrirrovannii logisticheskii menedjment na osnove mnogokriterialnoi ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya mashin [Integrated logistics management based on a multi-criteria assessment of the transport technical condition]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 22. №10 (141): 248-256 DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-248-256> (in Russian).

8. Buraev M., Ilyin P., Ilyin S., Shisteev A. and Anosova A. The calculation program of the technical service enterprise of transport-technological machines in agriculture. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012019>.

9. Zudov G.Y., Buslaeva I.I., Levin A.I. Operability of MAN F2000 Trucks in the North International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). 2019: 188. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.75>.

10. Aitbagina E.R., Vitvickii E.E., Yureva N.I. Vliyanie rasstoyaniya perevozok грузов na proizvodstvennyuyu sebestoimost v sovokupnosti mikro avtotransportnih sistem pri «insorsinge» [Influence of the distance of goods transportation on the production cost in the micro-motor transport systems as a whole at “insourcing”]. *Vestnik SibADI*. 2017; (1(53)): 135-143. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-43-50](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-43-50) (in Russian).

11. Krilova K.P., Vitvickii E.E. Vliyanie rasstoyaniya perevozok грузов na zatraty po arende gruppi avtotransportnih sredstv v gorodakh. Nauchnii recenziruemii jurnal. [The influence of the distance of transportation of goods on the cost on renting of a group of motor vehicles in cities]. *Vestnik SibADI*. 2017; (2(54)): 175-181. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-29](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-29) (in Russian).

12. Vitvickii E.E., Fedoseenkova E.S. Vliyanie vremeni prostoya pri vipolnenii pogruzochno_razgruzochnih rabot na funkcionirovanie sovokupnosti mikrosistem pri perevozke грузов avtomobilnim transportom obshchego polzovaniya [The influence of downtime during loading and unloading operations on the functioning of the total microsystems during the transportation of goods by public transport].

Vestnik SibADI. 2017; (3(55)): 41-47. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-41-47](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-41-47) (in Russian).

13. Aitbagina E.R., Vitvickii E.E. Vliyanie rasstoyaniya na rezultati raboti gruppi avtomobilei pri perevozke грузов gruzootpravitelem [The influence of distance on the results of operating of a group of transport at goods transportation by a supplier]. *Vestnik SibADI*. 2017; 56(4-5(56-57)): 14-24. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-14-24](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-14-24).

14. Fedoseenkova E.S., Vitvickii E.E. Vliyanie vremeni prostoya pod pogruzochno_ razgruzochnimi rabotami na funkcionirovanie sovokupnosti malih nenasischennih sistem perevozok stroitel'nykh грузов avtomobilnim transportom obshchego polzovaniya [The influence of downtime under loading and unloading operations on the functioning of a combination of small unsaturated systems for transporting building materials by public transport]. *Vestnik SibADI*. 2017; 56(4-5(56-57)): 47-61. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-47-61](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-47-61).

15. Tolebayeva A. Kh., Vitvitskiy E.E. and Markelova T.V. Enhancement of the efficiency of transportation of the company's own cargo in operational scheduling *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012063>.

16. Pechatnova E.V. Matematicheskoe modelirovanie kolebaniy sutochnoi intensivnosti dvizheniya. *Vestnik SibADI*. 2017; 56(4-5(56-57)):145-151. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-145-151](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-145-151). (in Russian)

17. Varakin V.V., Chebakova E.O. Influence of Technical and Operational Indicators on the Results of Planning Motor Transport Operation *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019)*. 2019; 188. DOI: <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.13>.

18. Janic M. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2007; 12 (1): 33-44. DOI: 10.1016/j.trd.2006.10.004.

19. Glushkova Yu.O., Gordashnikova O.Yu., Pahomova A.V. Vliyanie faktora vremeni na transport_noe obsluzhivanie mejdunarodnoi cepi postavki [The influence of the time factor on transport services of the international supply chain]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (6(58)): 23-29. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-23-29](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-23-29).

20. Wang R., Yang K., Yang L., Gao Z. Modeling and optimization of a road-rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018; 72. 423-436. DOI: 10.1016/j.engappai.2018.04.022.

21. Kurganov V.M., Mukaev V.N., Gryaznov M.V. Optimizatsiya zatrat na avtomobilnie perevozki promishlennogo predpriyatiya [Optimization of

automobile transportation costs in industrial enterprise]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15, № 5: 672-685. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-672-685>.

22. Temnov E.S. Analiz nekotorykh podhodov v sovremennoi praktike transportnogo modelirovaniya [The analysis of some approaches in modern practice of transport modeling]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(5): 708-717. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-708-717>. (in Russian)

23. Smirnov V.V., Semenov V. L., Kadyshhev E.N., Zakharova A.N. and Chainkov V.N. TQM/ISO at Russian enterprises. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012016>.

24. Fadeev A.I. The task of determining the matching of actual and planned operation plans in a dispatch control system of the road transport. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012021>.

25. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Struktura metodologii tekushego planirovaniya raboti gruzovogo avtotransportnogo predpriyatiya [The structure of the methodology of the current planning of the freight transport enterprise]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 6(58): 71-78. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71) (in Russian).

26. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Matematicheskaya model funkcionirovaniya avtotransportnogo predpriyatiya pri perevozke грузов v mejdugorodnom soobschenii dlya tekushego planirovaniya [A mathematical model of the operation of a transport company when transporting goods in intercity traffic for current planning]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 22, №4: 243-252. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-63-71](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-63-71) (n Russian).

27. Trofimova L.S. System planning the motor transport enterprise functioning in freighting in interurban communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. 012039. IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/632/1/012039.

28. Trofimova L.S. Fuzzy Set Theory for Planning the Operation of a Motor Transport Enterprise. *Advances in Intelligent Systems and Computing, VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia*. 2019; 2. Vol. 1116 (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_62.

29. Trofimova L.S., Kasimova A.B. Obzor teorii planirovaniya chislennosti rabotnikov gruzovih avtotransportnykh predpriyatii [A review of the theory of planning the number of employees of freight transport enterprises]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (1(53)): 89-96. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-89-96](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-89-96) (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Трофимова Людмила Семеновна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0001-7312-1557 (646800, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: trofimova_ls@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Liudmila S. Trofimova – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Organization of transportation and management on transport, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0001-7312-1557 (646800, Omsk, 5, e-mail: trofimova_ls@mail.ru).

УДК 656

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А.И. Фадеев, Е.В. Фомин, С. Алхуссейни
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из важнейших параметров транспортной системы является пропускная способность линий, которая на городском пассажирском транспорте обычно обуславливается пропускной способностью остановочных пунктов. При определении пропускной способности остановочных пунктов необходимо учитывать случайный характер потоков транспортных средств и процесса посадки (высадки) пассажиров.

В настоящей работе остановочный пункт рассматривается как многоканальная однофазовая система массового обслуживания (СМО) с очередью. На этой основе предлагается и обосновывается подход к определению пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта.

Материалы и методы. Рассматриваются две математические модели остановочного пункта как СМО: аналитическая и имитационная. С учетом анализа результатов, полученных по этим моделям, предлагаются рекомендации для расчета реальной пропускной способности остановочного пункта.

Результаты. В настоящей статье на примере конкретного остановочного пункта оценивается работоспособность предложенных математических моделей и формулируются рекомендации для определения его пропускной способности.

Обсуждение и заключение. Предложенный порядок определения пропускной способности остановочных пунктов, состоящий из выявления критических остановочных пунктов с наибольшим пассажирооборотом, определения параметров процесса обслуживания подвижного состава, расчета вероятности возникновения очереди позволяет устанавливать предельную интенсивность движения по линиям городского пассажирского транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остановочный пункт, пропускная способность остановочного пункта, время посадки (высадки) пассажиров, система массового обслуживания, моделирование остановочного пункта.

Поступила 04.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С. Определение пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 248-261. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261>

© Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261>

DETERMINATION OF THE THROUGHPUT CAPACITY OF STOP POINTS OF URBAN PUBLIC TRANSPORT

Aleksandr I. Fadeev, Evgeny V. Fomin, Sami Alhusseini

The Siberian Federal University,

Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. One of the most important parameters of the transport system is the capacity of line, which in urban public transport system is usually determined by the stop points throughput capacity. When determining the throughput capacity of stop points, it is necessary to consider the random nature of the transport flows at the stop and the process of boarding and alighting passengers.

In this work, the stop point is considered as a multi-channel single-phase queuing system (QS). On this basis, an approach to determining the throughput capacity of stop points in urban passenger transport is proposed and justified.

Materials and methods. Two mathematical models of a stop point as QS are considered: analytical and simulation. Based on the obtained analysis results from these models, recommendations are offered for calculating the actual throughput capacity of a stop point.

Results. In this article, as example a specific stop points are taken, to evaluate the performance of the proposed mathematical models and formulate recommendations to determine its throughput capacity.

Discussion and conclusion. The proposed procedure for determining the stop points throughput capacity, consisting of identifying critical stop points with the highest passengers traffic, determining the service process parameters of fleet, and calculating the probability of queue occurrence, allows to set the maximum traffic intensity for the lines of urban public transport.

KEYWORDS: stop point; traffic interval; stop points throughput capacity; bus service time; queuing system.

Submitted 04.04.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Fadeev A.I., Fomin E.V., Alhusseini S. Determination of the throughput capacity of stop points in urban public transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 248-261. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261>

© Fadeev A.I., Fomin E.V., Alhusseini S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров транспортной системы является пропускная способность линий, которая на городском пассажирском транспорте обычно обуславливается пропускной способностью остановочных пунктов [1, 2].

С целью исследования пропускной способности работа остановочного пункта описывается как многоканальная однофазовая система массового обслуживания (СМО) с очередью (рисунок 1). В систему с интенсивностью λ поступает поток заявок на обслуживание – транспортные средства для посадки (высадки) пассажиров. Каналом обслуживания является остановочное место подвижного состава на остановочном пункте. μ_i – производительность (интенсивность обслуживания) i -го канала. На данную СМО нецелесообразно накладывать ограничения по длине очереди и времени ожидания заявки в очереди.

Производительность (интенсивность обслуживания) канала обслуживания имеет случайный характер, который описывается одним из статистических законов, например, гамма-распределением, логарифмически нормальным распределением [2], показательным распределением [3, 4], распределением Эрланга [5] и т.д.

Во многих работах исследовались операции посадки (высадки) пассажиров на остановочных пунктах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Время нахождения транспортного средства на остановочном пункте можно разделить на несколько элементов [6], например, торможения, разгона транспортного средства, посадки (высадки) пассажиров

[7], открытия–закрытия дверей [8] и т.д. В некоторых работах (например [9, 10]) предлагается определять элементы времени нахождения транспортного средства на остановочном пункте посредством регрессионных зависимостей.

В работах [1, 3, 4, 5, 9, 10] установлено, что остановочные места остановочных пунктов имеют неодинаковую производительность: первое место обладает наибольшей производительностью, производительность каждого последующего места снижается. В этой связи введено понятие «эффективное количество остановочных мест», которое соответствует условному количеству мест с пропускной способностью первого остановочного места [1, 3, 4, 5, 9, 10].

Таким образом, с учетом неодинаковой производительности остановочных мест поток обслуженных заявок имеет интенсивность

$$\mu = \sum_{i=1}^m \mu_i = k_m \mu', \quad (1)$$

где m – количество занятых каналов обслуживания;

μ_i – производительность (интенсивность обслуживания) i -го канала;

k_m – коэффициент приведения к интенсивности обслуживания первого канала (μ') при n занятых каналах обслуживания ($k_1 = 1; k_2 \leq 2; \dots$).

В некоторых работах (например [9]) пропускная способность остановочного пункта определяется как величина, обратная математическому ожиданию среднего времени обслуживания одной заявки.



Рисунок 1 – Схема остановочного пункта как СМО
 $O_1, \dots, O_n$ – каналы обслуживания

Figure 1 – Diagram of a stop point as a QS
 $O_1, \dots, O_n$ – service channels (stopping places)

Очевидно, что такая величина предельной пропускной способности не может использоваться на практике, т.к. в этом случае СМО неработоспособна¹, по теории в системе формируется очередь заявок неограниченной длины.

Реальная пропускная способность остановочного пункта при условии нормального функционирования системы меньше упомянутой предельной величины. Для расчета реальной пропускной способности с учетом случайного характера процессов поступления заявок и их обслуживания в некоторых работах предлагается использовать соответствующие коэффициенты [1, 9, 21]. Например, в работе [9] применяется коэффициент неравномерности входящего потока заявок, определенный как отношение максимальной зафиксированной интенсивности потока транспортных средств к средней интенсивности за расчетный период. В работе [1] используется коэффициент вероятности отказа в заявке на обслуживание и коэффициент вариации времени обслуживания пассажиров на остановочном пункте. Однако не доказано, что применение рассматриваемых коэффициентов во всех случаях обеспечивают получение приемлемых для практики результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе рассматриваются две математические модели остановочного пункта как СМО: аналитическая и имитационная. С учетом анализа результатов, полученных по этим моделям, предлагаются рекомендации для расчета реальной пропускной способности остановочного пункта.

Данная СМО является разомкнутой. Для таких систем с непрерывным потоком требований и неограниченным временем ожидания обслуживания характерны следующие особенности функционирования:

- при наличии свободного канала поступающее требование, поступившее в систему, немедленно начинает обслуживаться;
- если все n каналов обслуживания заняты, требование помещается в очередь ожидания обслуживания;
- после освобождения канала обслуживания следующее требование выбирается из очереди в соответствии с установленной дисциплиной, чаще всего выбор осуществляется

по принципу «первым пришел – первым обслуживается»;

– очередь требований, ожидающих обслуживания, не ограничена.

Аналитическая модель применима для простейшего потока (стационарного потока без последствия), пуассоновского распределения потока требований и показательного закона распределения времени обслуживания. В противном случае применяется имитационная модель [22, 23, 24, 25].

В работах [3, 4] получены следующие расчетные зависимости параметров рассматриваемой СМО при установившемся режиме с учетом неодинаковой производительности остановочных мест:

вероятность отсутствия требований в системе

$$P_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{\prod_{i=1}^n k_i} + \frac{\rho^{n+1}}{\prod_{i=1}^n k_i \cdot (k_n - \rho)} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$;

вероятность очереди в системе

$$P_{wt} = P_0 \frac{\rho^n}{\prod_{i=1}^n k_i} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{\rho}{k_n})}, \quad (3)$$

средняя длина очереди

$$\bar{l}_{wt} = P_0 \frac{\rho^{n+1}}{\prod_{i=1}^n k_i \cdot (k_n - \rho)^2}. \quad (4)$$

Данные зависимости имеют смысл при условии $\frac{\rho}{k_n} < 1$.

Предлагается следующая методика имитационного моделирования остановочного пункта общественного транспорта.

Известны три принципа имитационного моделирования, которые различаются по организации последовательности обрабатываемых событий². Во-первых, принцип последовательной проводки заявки, в соответствии с которым для каждой поступающей заявки осуществляется

¹ Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Пер. И.И. Глушко; ред. В.И. Нейман. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

² Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. Главная редакция физико-математических наук. М.: Наука, 1978. 402 с.

ется расчет всех операций обслуживания: заявка последовательно проводится через операции обслуживания. Преимущества данного подхода – простота реализации. К основным недостаткам можно отнести неприменимость для сложных систем.

Во-вторых, принцип Δt : временная ось делится на равные промежутки (Δt), в которых формируются события, изменяющие состояние системы. Основная проблема данного подхода: задание интервала Δt . Слишком малый интервал приводит к увеличению времени моделирования, при увеличении Δt повышается погрешность моделирования.

В-третьих, принцип, основывающийся на определении времени ближайшего события. Такой подход считается наиболее эффективным.

В данной работе имитационная модель остановочного пункта формулируется на основе принципа последовательной проводки заявки. В системе имеется два случайных процесса: поступления заявок, обслуживания заявок.

Время поступления i -й заявки формируется следующим образом:

$$t_i^\lambda = t_{i-1}^\lambda + \tau_i^\lambda, \quad (5)$$

τ_i^λ – случайный интервал времени между заявками, поступающими в систему, определяемый в соответствии с заданным законом распределения.

Время завершения обслуживания заявки

$$t_j^\mu = t_j^b + \tau_j^\mu, \quad (6)$$

где t_j^b – время начала обслуживания (постановки заявки на обслуживание);

τ_j^μ – случайная продолжительность обслуживания заявки, определенная в соответствии с заданным законом распределения.

На рисунке 2 приведена схема изменения состояний СМО. Событиями, влияющими на состояние системы, являются поступление и завершение обслуживания заявки. Очередь в системе возникает, если количество необслуженных заявок превышает число каналов обслуживания. Множество заявок A , находящихся в системе, описывается следующим реляционным отношением:

$$A(I, T^i, T^s, T^o), \quad (7)$$

где I – Id заявки на обслуживание;

T^i, T^s, T^o – время поступления, начала обслуживания и завершения обслуживания заявки.

В системе n каналов обслуживания, t_j^μ – время освобождения j -го канала обслуживания ($j = \overline{1, n}$). Известны статистические законы поступления и обслуживания заявок.

Алгоритм имитационного моделирования функционирования остановочного пункта:

1. Инициализация системы:

- количество каналов обслуживания;
- закон распределения входящего потока заявок;
- закон распределения времени обслуживания заявок каждым каналом;
- время освобождения каналов устанавливается в 0 (все каналы свободны).

2. Определение случайного (распределенного соответствующим образом) момента времени поступления заявки t_i . Расчет атрибутов кортежа a_k заявки следующим образом:

2.1. Время поступления заявки $t_k^i = t_i$.

2.2. Определение момента времени начала обслуживания заявки. Для этого выбирается канал обслуживания с наименьшим временем освобождения $t_j^\mu = \text{Min}(t_i^\mu)$, $i = \overline{1, n}$.

Таким образом, время начала обслуживания

$$t_k^s = \begin{cases} t_k^i, & \text{если } t_k^i \geq t_j^\mu \\ t_j^\mu, & \text{если } t_k^i < t_j^\mu \end{cases} \quad (8)$$

2.3. Рассчитывается время завершения обслуживания заявки

$$t_k^o = t_k^s + \tau_j^\mu, \quad (9)$$

где τ_j^μ – продолжительность обслуживания заявки j -м каналом, определенная в соответствии с определенным случайным законом.

Время освобождения j -го канала $t_j^\mu = t_k^o$.

3. Проверка условия завершения моделирования $t_i > T$. Если условие выполняется, моделирование завершено, осуществляется расчет результатов моделирования.

В обратном случае – переход к п. 2.

Расчет параметров функционирования СМО по результатам имитационного моделирования осуществляется следующим образом:

1. Вероятность отсутствия требований в системе

$$P_0 = T_0 / T, \quad (10)$$

где T_0 – суммарное время нахождения системы в состоянии S_0 в процессе моделирования;

T – общая длительность имитации.

2. Вероятность очереди в СМО

$$P_{wt} = \sum_{i>n} T_i / T, \quad (11)$$

где T_i – суммарное время нахождения системы в состоянии S_i

3. Средняя длина очереди

$$l_{wt} = \frac{\sum_{i>n} iT_i}{\sum_{i>n} T_i}. \quad (12)$$

4. Суммарное время нахождения системы в состоянии S_i

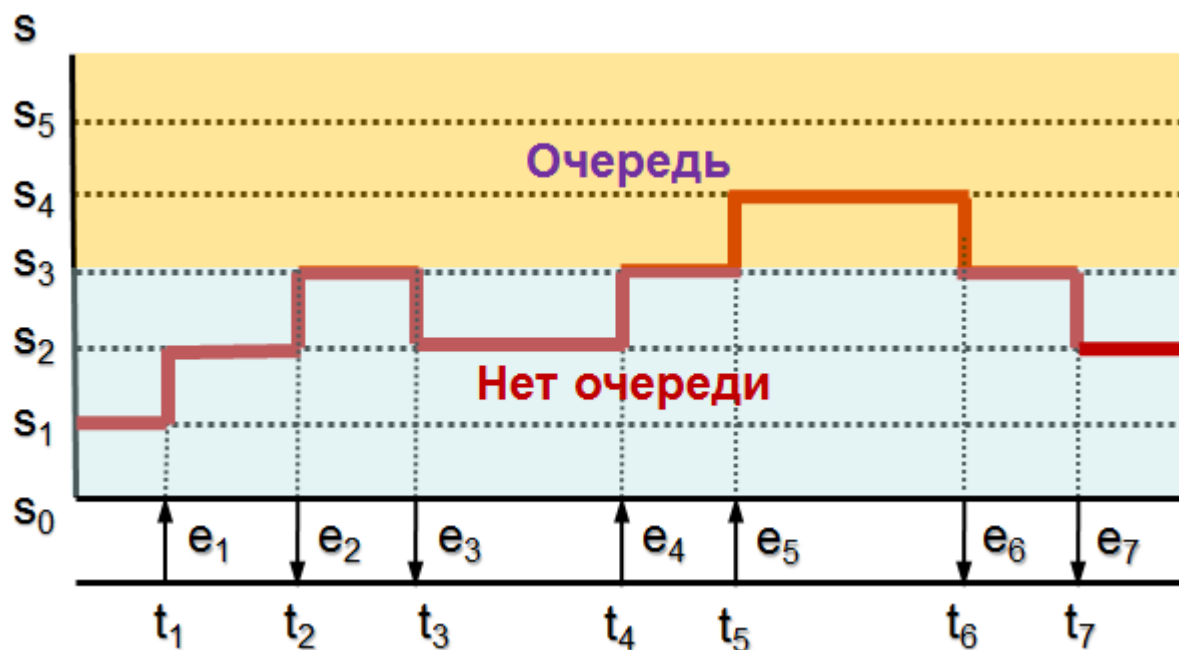
$$T_i = \sum_{s_{j-1,j}=i} (t_j - t_{j-1}). \quad (13)$$

В настоящей статье на примере конкретного остановочного пункта оценивается работоспособность предложенных математических моделей и формулируются рекомендации для определения его пропускной способности. На основе выборки длительности обслуживания заявок устанавливается³:

– теоретический закон распределения процесса обслуживания транспортных средств на остановочном пункте;

– зависимость времени обслуживания заявки от номера остановочного места на остановочном пункте.

В таблицах 1, 2 приведены результаты обработки выборки длительности обслуживания заявок. Совокупность подразделена на три выборки в зависимости от номера канала обслуживания (номера места остановки на остановочном пункте). Диапазон выборки от 15 до 87 с разделен на 10 интервалов. Установлено, что, как и в других исследованиях, каналы обслуживания имеют неодинаковую производительность: среднее время обслуживания заявки возрастает с увеличением номера канала.



где $s_j, j = \overline{1, \infty}$ – состояние СМО определяемое по числу заявок в системе

Рисунок 2 – Схема изменений состояний СМО (с тремя каналами)

Figure 2 – Diagram of changes in the condition of the QS (with three channels)

³ Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. М.: Мир, 1980, 510 с.

Таблица 1
Результаты обработки экспериментальных данных случайного процесса обслуживания
транспортных средств на остановочном пункте
 $(X_i$ – середина интервала; I, II, III – номер места остановки)

Table 1
Results of experimental data processing of the serving vehicles random process at the stop point
 $(X_i$ is the average interval; I, II, III is the number of the stopping place)

Интервал, с	Частота			X_i	Вероятность					
					Выборка			Оценка		
	I	II	III		I	II	III	I	II	III
15–23	6	3	3	19	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
23–31	32	27	14	27	0,16	0,13	0,09	0,08	0,07	0,06
31–39	46	50	30	35	0,22	0,25	0,20	0,17	0,16	0,14
39–47	46	36	30	43	0,22	0,18	0,20	0,22	0,22	0,20
47–55	27	31	25	51	0,13	0,15	0,17	0,20	0,20	0,21
55–63	24	23	21	59	0,12	0,11	0,14	0,14	0,15	0,16
63–71	13	13	13	67	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,11
71–79	7	12	9	75	0,03	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06
79–87	5	6	4	83	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
ИТОГО:	206	201	149		1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98

На рисунке 3 дана гистограмма распределения времени обслуживания заявок каждым каналом. Из рисунка 3 видно, что рассматриваемый случайный процесс не соответствует показательному закону распределения, он подчиняется гамма-распределению с параметрами, приведенными в таблице 2. Расчетные значения критерия χ^2 не превышают критических, т.е. гипотеза о гамма-распределении

времени обслуживания заявок подтверждается.

Рассматриваем случай простейшего пуассоновского потока поступления транспортных средств на остановочный пункт, хотя в общем виде предложенная имитационная модель применима для любого случайного потока поступления транспортных средств на остановочный пункт.

Таблица 2
Параметры распределения времени обслуживания транспортных средств
на остановочном пункте

Table 2
The distribution parameters of serving vehicles time at the stop point

Параметры распределения	Оценка	Расчетное значение		
		Место I	Место II	Место III
Альфа (a)	9,098	8,9	9,2	9,6
Бета (b)	4,893	5,0	5,0	5,0
Математическое ожидание, с		44,51	46,22	48,10
Стандартное отклонение	14,6			
Дисперсия	218,0			

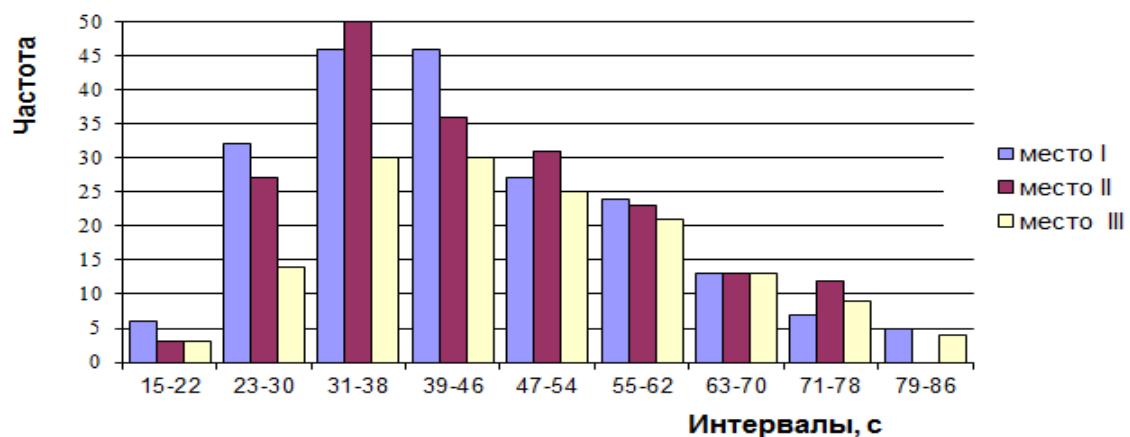


Рисунок 3 – Гистограмма распределения времени обслуживания заявок

Figure 3 – Time distribution of serving requests

Для расчета параметров функционирования остановочного пункта как СМО используются выражения (2), (3), (4) аналитической модели и (10), (11) и (12) имитационной модели. Для аналитической модели случайный процесс поступления и обслуживания заявок считается простейшим пуассоновским. В имитационной модели применяются параметры случайных процессов, соответствующие результатам обследования.

Для имитационной модели требуется определить порядок расчетов случайных интервалов между событиями, которые подчиняются заданному случайному закону. Применяются следующие методы определения случайных величин с заданным распределением: аналитический (метод обратной функции), табличный и метод композиций.

В данной работе используются первые два метода. По аналитическому методу на основании равномерно распределенной в интервале (0, 1) случайной величины рассчитывается величина, распределенная по заданному закону.

Гамма-распределение непрерывной случайной величины x описывается плотностью распределения

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^b}{(b-1)!} x^{b-1} e^{-\lambda x}, & x > 0; \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (14)$$

где λ, b – параметры гамма-распределения ($\lambda > 0, b > 0, a = 1/\lambda$).

Если b принимает целочисленные значения, гамма-распределение называется распределением Эрланга.

Математическое ожидание рассчитывается⁴

$$m_x = b / \lambda. \quad (15)$$

Гамма-распределение сводится к экспоненциальному распределению, если $b=1$.

В большинстве случаев вместо гамма-распределения можно использовать распределение Эрланга. Случайная величина x , имеющая распределение Эрланга, – это сумма независимых случайных величин x_i , имеющих экспоненциальное распределение, т.е.:

$$x = \sum_{i=1}^b x_i. \quad (16)$$

Машинный алгоритм для имитации гамма-распределения⁵

$$x = \sum_{i=1}^b \left(-\frac{1}{\lambda} \ln R_i \right) = -\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^b \ln R_i = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\prod_{i=1}^b R_i \right), \quad (17)$$

⁴ Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 510 с

⁵ Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.

где R_i – равномерно распределенное случайное число.

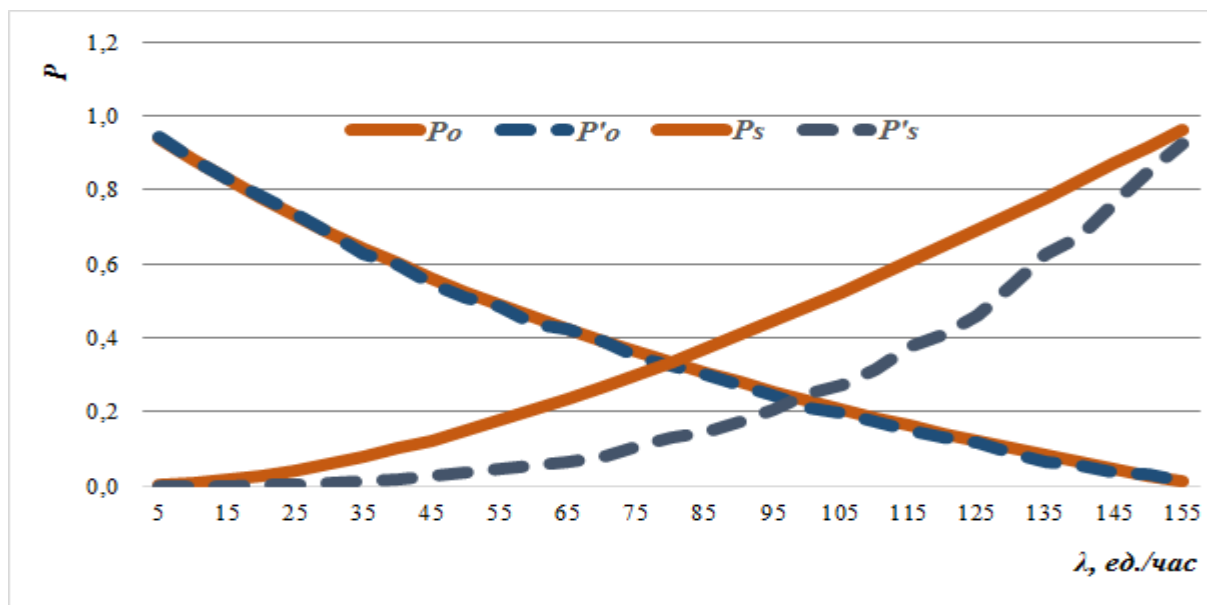
Машинный алгоритм (17) используется как для показательного, так и для гамма-распределения (в случае показательного распределения $b=1$).

На рисунке 4 даны сравнительные результаты расчетов параметров СМО с применением аналитической и имитационной модели для остановочного пункта с двумя остановочными местами. Интенсивность входящего потока заявок варьировалась с 5 единиц в час до предела пропускной способности СМО с шагом 5 единиц. Функционирование системы для каждой интенсивности входящего потока моделировалось в течение 100 ч условного (машинного) времени. Для СМО с двумя каналами обслуживания (см. рисунок 4) предел пропускной способности составил 155 единиц в час.

Из рисунка 4 видно: значения вероятности отсутствия заявок в очереди, полученные из аналитических расчетов P_o , практически совпадают с имитационным моделированием P'_o . Однако вероятность очереди в системе,

определенная из аналитической модели P_s , значительно отличается от имитационного моделирования P'_s . Таким образом, для расчета параметров остановочного пункта аналитическую модель следует использовать исключительно при простейших пуассоновских случайных процессах поступления и обслуживания транспортных средств. Для других случаев необходимо применять имитационную модель.

Рассматриваем результаты имитационного моделирования остановочного пункта, варьируя количеством остановочных мест от 1 до 3. На рисунке 5 приведены зависимости вероятности отсутствия заявок в системе P_o и вероятности очереди P_s для рассматриваемых вариантов остановочного пункта при варьировании интенсивности заявок от 5 заявок в час до предела пропускной способности. Получены следующие предельные значения пропускной способности рассматриваемых вариантов конфигурации остановочного пункта: 80 единиц в час для одного остановочного места, 155 единиц в час – двух мест и 230 единиц в час для трех мест соответственно.

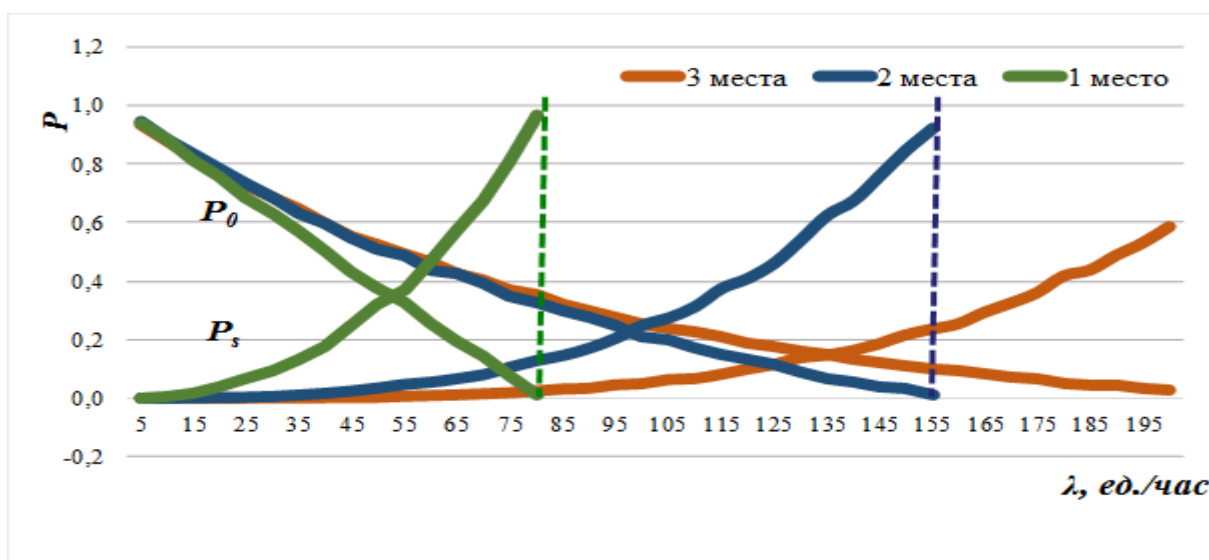


где P_o, P'_o – вероятность отсутствия заявок в системе по аналитической и имитационной модели соответственно;

P_s, P'_s – вероятность очереди заявок по аналитической и имитационной модели соответственно

Рисунок 4 – Зависимость вероятности отсутствия заявок в системе и наличия очереди от интенсивности поступления требований (λ)

Figure 4 – The dependence of the probability of requests absence in the system and the probability of queue occurrence on service requests flow intensity (λ)



где

P_o - вероятность отсутствия заявок в системе; P_s - вероятность очереди

Рисунок 5 – Параметры функционирования остановочного пункта при различном количестве остановочных мест (от 1-го до 3-х остановочных мест)

Figure 5 – Parameters of the stop point functioning for a different number of stopping places (from 1 to 3 stopping places)

Очевидно, что на практике применение предельных пропускных способностей остановочного пункта недопустимо. На остановочном пункте будет постоянно присутствовать очередь транспортных средств, которая заблокирует улично-дорожную сеть. Остановочный пункт должен иметь запас пропускной способности для бесперебойного функционирования маршрутной сети.

Нормальным (наиболее эффективным) режимом функционирования остановочных пунктов является отсутствие очереди. Очереди транспортных средств на остановочный пункт приводят к негативным процессам, существенно снижающим пропускную способность улично-дорожной сети и уровень безопасности дорожного движения. Предлагается пропускную способность остановочного пункта определять по критерию отсутствия очереди, применяя стандартные в статистике уровни значимости вероятности очереди 10%, 5% и 1%. Аналогичный подход применен в HCM 2010 [1], в котором нормируется вероятность отказа транспортному средству в обслуживании (заняты все остановочные места) при условии нормального распределения времени обслуживания пассажиров.

В таблице 3 даны параметры пропускной

способности остановочного пункта, полученные по результатам имитационного моделирования. Для конфигурации остановочного пункта из одного, двух и трех остановочных мест для уровней значимости P_{s1} 0,01, 0,05 и 0,1 приведены вероятности отсутствия заявок в системе (P_o), вероятности очереди из двух (P_{s2}), трех (P_{s3}) и четырех (P_{s4}) заявок. Из таблицы 3 видно, что пропускная способность остановочного пункта при уровне значимости вероятности очереди $P_{s1}=0,01$ обеспечивает функционирование остановочного пункта практически без очередей. Только 1% времени на остановочном пункте наблюдается очередь, длина которой не превышает одну заявку. При уровне значимости вероятности очереди $P_{s1}=0,05$ в системе порядка 1% времени будет наблюдаться очередь из двух заявок. Уровень значимости $P_{s1}=0,1$ предполагает работу системы с очередью в 10% времени, в 2–3% времени очередь будет состоять из 2 заявок, а в 1% времени – из трех заявок.

Таким образом, пропускную способность системы, исходя из уровня значимости вероятности очереди в 1%, следует устанавливать для случаев существенного влияния очереди транспортных средств к остановочному пункту на улично-дорожный трафик.

Таблица 3
Параметры пропускной способности остановочного пункта

Table 3
Parameters of the stop point throughput capacity

Интенсивность λ , ед./час	Вероятность от- сутствия заявок P_0	Вероятность очереди			
		Одна и более зая- вок P_{s1}	Две и более заяв- ки P_{s2}	Три и более заяв- ки P_{s3}	Четыре и бо- лее заявки P_{s4}
Одно место					
11	0,872	0,01	0,001	0,000	0,000
22	0,726	0,05	0,008	0,001	0,000
31	0,617	0,10	0,024	0,006	0,001
Два места					
34	0,641	0,01	0,001	0,000	0,000
57	0,469	0,05	0,012	0,003	0,001
74	0,358	0,10	0,031	0,010	0,003
Три места					
62	0,447	0,01	0,002	0,000	0,000
100	0,256	0,05	0,015	0,004	0,001
120	0,189	0,10	0,037	0,014	0,005

Например, если остановочный пункт расположен непосредственно после перекрестка, на улично-дорожной сети отсутствует возможность формирования очереди транспортных средств. Уровень значимости вероятности очереди 10% рекомендуется использовать в тех случаях, когда очередь транспортных средств к остановке не приводит к возникновению транспортных заторов на улично-дорожной сети.

В некоторых случаях через остановочный пункт проходят потоки транспортных средств разной вместимости [22]. Очевидно, что продолжительность посадки (высадки) пассажиров для подвижного состава неодинаковой вместимости может существенно различаться. Такие случаи описываются посредством СМО с неоднородным потоком заявок, т.е.:

- в систему поступает определенное число классов заявок (количество классов заявок соответствует числу классов вместимостей транспортных средств, проходящих через остановочный пункт);

- для каждого из классов заявок известны параметры случайных процессов поступления и обслуживания.

Приведенный в настоящей работе алгоритм имитационного моделирования остановочного пункта позволяет определить параметры его пропускной способности при неоднородном потоке заявок.

Таким образом, предлагается следующий порядок определения пропускной способности остановочных пунктов при формировании (оптимизации) программы перевозок (транспортного предложения):

- устанавливается список лимитирующих остановочных пунктов (пунктов с наибольшим пассажирооборотом) по каждому из направлений маршрутной сети;

- проводится обследование данных остановочных пунктов для расчета параметров случайных процессов поступления заявок и их обслуживания;

- с использованием аналитической или имитационной модели осуществляется расчет параметров пропускной способности рассматриваемых остановочных пунктов;

- проводится оценка результатов расчета: для направлений с недостаточной пропускной способностью принимается решение о корректировке транспортного предложения или увеличении остановочных мест, снижении интенсивности движения за счет увеличения вместимости подвижного состава и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Пропускная способность линий городского пассажирского транспорта во многом ограничивается пропускной способностью остановочных пунктов, на которую существенное влияние оказывают параметры случайных

процессов поступления транспортных средств и времени посадки (высадки) пассажиров.

Для расчета реальной пропускной способности в некоторых работах предлагается использовать соответствующие коэффициенты, учитывающие случайный характер процессов функционирования остановочного пункта. Однако не доказано, что применение рассматриваемых коэффициентов во всех случаях обеспечивает получение приемлемых для практики результатов.

2. Разработанная математическая модель функционирования остановочного пункта городского пассажирского транспорта как многоканальной однофазовой системы массового обслуживания с очередью позволяет определять зависимость пропускной способности остановочных пунктов от количества остановочных мест, обладающих неодинаковой производительностью, и параметров случайного процесса обслуживания подвижного состава.

3. Предложенный порядок определения пропускной способности остановочных пунктов, состоящий из выявления критических остановочных пунктов с наибольшим пассажирооборотом, определения параметров процесса обслуживания подвижного состава, расчета вероятности возникновения очереди, позволяет устанавливать предельную интенсивность движения по линиям городского пассажирского транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1134 p.
2. Липенков А.В., Елисеев М.Е. Определение пропускной способности остановочного пункта городского пассажирского транспорта при непостоянном числе мест обслуживания // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 79–81.
3. Фадеев А.И., Фомин Е.В. К вопросу о пропускной способности остановочных пунктов // Интегрированная логистика, издательство: Всероссийский институт научной и технической информации РАН (Москва). 2012. №2. С. 7–11.
4. Фомин Е.В., Фадеев А.И. Методика определения пропускной способности остановочных пунктов ГПТ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №4(63). С. 117–124.
5. Гудков В.А. К вопросу о пропускной возможности автобусных остановочных пунктов / В.А. Гудков [и др.] // Автотранспортное предприятие. 2003. № 4. С. 26 – 28.
6. Самойлович Т. Н. Длительность операций при стоянке маршрутных пассажирских транспортных

средств для высадки и посадки пассажиров // Наука и техника: международный научно-технический журнал. 2013. № 3. С. 48–55.

7. Затонский А.В., Володина Ю.И. Имитационная балансовая модель остановки городского общественного транспорта // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. №12. С. 70–77.

8. Липенков А.В. О результатах комплексного исследования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта в г. Нижнем Новгороде // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №4. С. 93–102.

9. Димова И.П., Грачев В.В. Определение пропускной способности остановочных пунктов на современном этапе развития пассажирских перевозок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2008. № 4 (36). С. 66–70.

10. Димова И.П., Борщенко Я.А. Повышение эффективности работы городского пассажирского транспорта на основе исследования показателей работы остановочных пунктов // Наука, техника и образование. 2014. № 5 (5). С. 62–65.

11. Липенков А.В. Исследование простоев маршрутных транспортных средств в ожидании дополнительных пассажиров на остановочных пунктах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №2 (85). С. 160–166.

12. Елисеев М.Е., Липенков А.В., Маслова О.А. О подходах к моделированию времени простоя автобусов на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №3. С. 84–93.

13. Зедгенизов А. В. Оценка времени освобождения остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Вестник ИРГТУ. 2007. № 4(32). С. 145–151.

14. Липенков А.В., Кузьмин Н.А., Ерофеева Л.Н. Математическая модель пропускной способности остановочного пункта в случае отсутствия маневров по обгону автобусами друг друга // Вестник Оренбургского университета. 2015. №4 (179). С. 87–94.

15. Исхаков М.М. Выбор участка на остановочном пункте для обслуживания пассажиров маршрутных транспортных средств // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10. С. 59–63.

16. Калюжный М.В. Закономерности изменения времени простоя транспортных средств на остановочных пунктах маршрута городского пассажирского транспорта // Вестник ДИАТ. 2008. №3. С. 15–20.

17. Калюжный М.В. Моделирование продолжительности простоя транспортных средств на остановочных пунктах маршрута городского пассажирского транспорта // Вестник ДИАТ. 2009. №2. С. 14–18.

18. Зедгенизов А.В. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Вестник ИРГТУ. 2008. № 3(35). С. 121–123.

19. Зедгенизов А.В. Остановочные пункты городского пассажирского транспорта: монография ИРГТУ: LAP Lambert Academic Publishing, 2009. 120 с.

20. Zedgenizov A.V., Levashev A.G., Mikhailov A.Y., Verification of the transit stops capacity model. Networks for mobility 2008: Proceedings of the 4th International Symposium, Stuttgart, FOVUS, 2008. pp. 23, 25.

21. Al-Mudhaffar A., Nissan A., Bang K.-L. Bus Stop and Bus Terminal Capacity. Transportation Research Procedia 14:1762-1771, 2016. pp. 1762 – 1771

22. Кажаев А.А. Имитационная модель загрузки остановочных пунктов городского маршрутного транспорта // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2011. №1. С. 86–94.

23. Елисеев М.Е., Липенков А.В., Маслова О.А. О подходах к моделированию времени простоя автобусов на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №3. С. 84–93.

24. Сочнев А.Н. Имитационное моделирование движения маршрутных автобусов // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12603> (дата обращения: 02.02.2020).

25. Fernandez, R., 2010. Modelling public transport stops by microscopic simulation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 18(6). pp. 856-868.

REFERENCES

1. Highway Capacity Manual 2000. *Transportation Research Board*, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1134 p.

2. Lipenkov A.V., Eliseev M.E. *Opređenje propusnosti sposobnosti ostanovochного пункта go-rodского passazhirского транспорта pri nepostojannom chisle mest obsluzhivaniya* [Determination of the throughput capacity of a stopping point of urban passenger transport with a variable number of service locations]. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2014; 3: 79-81 (in Russian).

3. Fadeev A.I., Fomin E.V. *K voprosu o propusnoj sposobnosti ostanovochnyh punktov* [The issue of stopping points capacity]. *Integrirrovannaja logistika, izdatel'stvo: Vserossijskij institut nauchnoj i tehničeskoy informacii RAN (Moscow)*. 2012; 2: 7-11 (in Russian).

4. Fomin E.V., Fadeev A.I. *Metodika opredelenija propusnoj sposobnosti ostanovochnyh punktov GPT* [The methodology for determining the throughput capacity of stopping points]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2012; 4(63): 117-124 (in Russian).

5. Gudkov V.A. *K voprosu o propusnoj vozmozhnosti avtobusnyh ostanovochnyh punktov* [The issue of bus stopping capacity]. *Avtotransportnoe predpriyatje*. 2003; 4: 26 – 28. (in Russian).

6. Samojlovich T.N. *Dlitel'nost' operacij pri stojanke marshrutnyh passazhirskih transportnyh sredstv dlja*

vysadki i posadki passazhirov [Duration of operations when fixed-route passenger vehicles stop for boarding and alighting passengers]. *Nauka i tehnika: mezhdunarodnyj nauchnotekhnicheskij zhurnal*. 2013; 3: 48–55. (in Russian).

7. Zatonskij A.V., Volodina Ju.I., *Imitacionnaja balansovaja model' ostanovki gorodского obshhestvennogo transporta* [Simulation balance model of urban public transport stop]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtohozjajstvo*. 2013; 12: 70-77 (in Russian).

8. Lipenkov A.V. *O rezul'tatah kompleksnogo issledovaniya ostanovochnyh punktov gorodского passazhirского транспорта v g. Nizhnem Novgorode* [Review the results of a comprehensive study of stopping points for urban public transport in Nizhny Novgorod]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2012; 4: 93-102 (in Russian).

9. Dimova I. P., Grachev V.V., *Opređenje propusnoj sposobnosti ostanovochnyh punktov na sovremennom etape razvitiya passazhirskih perevozok* [Determining the capacity of stopping points at the present stage of development of passenger traffic]. *Vestnik IrGTU*. 2008; 4 (36): 66 – 70 (in Russian).

10. Dimova I.P., Borshhenko Ja.A. *Povyshenie jeffektivnosti raboty gorodского passazhirского транспорта na osnove issledovaniya pokazatelej raboty ostanovochnyh punktov* [Improving the efficiency of urban passenger transport based on a study of stopping point performance]. *Nauka, tehnika i obrazovanie*. 2014; 5 (5): 62-65 (in Russian).

11. Lipenkov A.V. *Issledovanie prostoev marshrutnyh transportnyh sredstv v ozhidanii dopolnitel'nyh passazhirov na ostanovochnyh punktah* [The study of dead time of fixed-route vehicles in anticipation of additional passengers at stopping points]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2014; 2 (85): 160-166 (in Russian).

12. Eliseev M.E., Lipenkov A.V., Maslova O.A. *O podhodah k modelirovaniyu vremeni pro-stoja avtobusov na ostanovochnyh punktah gorodского passazhirского транспорта* [On approaches to modeling bus time at bus stops in urban passenger transport]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2012; 3: 84-93 (in Russian).

13. Zedgenizov A. V. *Ocenka vremeni osvobozhdenija ostanovochного пункта gorodского passazhirского транспорта* [Estimation of the time of stopping point of urban passenger transport to be free]. *Vestnik IrGTU*. 2007; 4(32): 145-151 (in Russian).

14. Lipenkov A.V., Kuz'min N.A., Erofeeva L.N. *Matematicheskaja model' propusnoj sposobnosti ostanovochного пункта v sluchae otsutstvija manevrov po obgonu avtobusami drug druga* [A mathematical model of the throughput of a stopping point in the absence of maneuvers for overtaking each other by buses]. *Vestnik Orenburgskogo universiteta*. 2015; 4 (179): 87-94 (in Russian).

15. Ishakov M.M. *Vybor uchastka na ostanovochnom punkte dlja obsluzhivaniya passazhirov marshrutnyh transportnyh sredstv* [Selecting a site at a stopping point for serving passengers of fixed-route vehicles]. *Vestnik*

Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011; 10: 59–63 (in Russian).

16. Kaljuzhnyj M.V. Zakonomernosti izmenenija vremeni prostoja transportnyh sredstv na ostanovochnyh punktah marshruta gorodskogo passazhirskogo transporta [Patterns of changes in vehicle dead time at stopping points of the urban passenger transport route]. *Vestnik DIAT*. 2008; 3: 15–20 (in Russian).

17. Kaljuzhnyj M.V. Modelirovanie prodolzhitel'nosti prostoja transportnyh sredstv na ostanovochnyh punktah marshruta gorodskogo passazhirskogo transporta [Modeling the duration of dead time of vehicles at stopping points of the route of urban passenger transport]. *Vestnik DIAT*. 2009; 2: 14–18 (in Russian).

18. Zedgenizov A.V. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya ostanovochnyh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta [Improving the functioning of stopping points for urban passenger transport]. *Vestnik IrGTU*, 2008; 3(35):121–123 (in Russian).

19. Zedgenizov A.V. *Ostanovochnye punkty gorodskogo passazhirskogo transporta* [Stopping points for urban passenger transport]: monogr. IrGTU: LAP Lambert Academic Publishing, 2009: 120. (in Russian).

20. Zedgenizov A.V., Levashev A.G., Mikhailov A.Y., Verification of the transit stops capacity model. *Networks for mobility 2008: Proceedings of the 4th International Symposium, Stuttgart, FOVUS*, 2008: 23, 25.

21. Al-Mudhaffar A., Nissan A., Bang K.L. Bus Stop and Bus Terminal Capacity. *Transportation Research Procedia*. 14:1762-1771, 2016: 1762 – 1771.

22. Kazhaev A.A. Imitacionnaja model' zagruzki ostanovochnyh punktov gorodskogo marshrutnogo transporta [A simulation model of the load of stopping points of urban transport route]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*. 2011; 1: 86–94 (in Russian).

23. Eliseev M.E., Lipenkov A.V., Maslova O.A. O podhodah k modelirovaniju vremeni prostoja avtobusov na ostanovochnyh punktah gorodskogo passazhirskogo transporta [On approaches to modeling bus downtime at bus stops in urban passenger transport]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2012; 3: 84–93. (in Russian).

24. Sochnev A.N. Imitacionnoe modelirovanie dvizhenija marshrutnyh avtobusov [Simulation of the movement of shuttle buses] *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*. 2012; 5. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12603> (in Russian).

25. Fernandez, R., Modelling public transport stops by microscopic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2010; 18(6): 856–868.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. – Разработка методики расчета пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, разработка алгоритма имитационного моделирования

остановочного пункта как СМО, анализ полученных расчетов.

Фомин Е.В. – Получение экспериментальных выборок длительности обслуживания заявок и интенсивности их поступления. Участие в проведении расчетов. Обзор литературных источников.

Алхуссейни С. – Анализ состояния вопроса. Обзор литературных источников. Участие в подготовке и анализе исходных данных для расчетов.

AUTHORS CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeev – Development of a methodology for calculating the throughput capacity of stop points in urban passenger transport, development of an algorithm for simulating a stop point as QS, analysis of the obtained calculations.

Evgeny V. Fomin – Obtaining experimental samples of the duration of service requests and the intensity of their receipt. Participation in the calculations. Review literary sources.

Sami Alhusseini – Analysis the issue status. Review literary sources. Participation in preparation and analysis input data for calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57208356151, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Куренского, д.26, e-mail: fai@ak1967.ru).

Фомин Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57212171682, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Куренского, д.26, e-mail: 2325337@mail.ru).

Алхуссейни Сами – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета «СФУ», ORCID: orcid.org/0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Куренского, д.26, e-mail: eng.sami20143@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Transport at Siberian Federal University, Scopus ID: 57208356151, (660074, Krasnoyarsk, Akademika Kirenskogo st., 26. E-mail: fai@ak1967.ru).

Evgeny V. Fomin – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Transport at Siberian Federal University, Scopus ID: 57212171682, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogo st., 26. E-mail: 2325337@mail.ru).

Sami Alhusseini – Postgraduate student of the Department of Transport at Siberian Federal University, ORCID: 0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogo st., 26. E-mail: eng.sami20143@gmail.com).

УДК 656.136.073

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272>

СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ КОНТРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

А.В. Цыганов, Н.А. Осинцев
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приоритетным направлением развития транспортных систем является формирование транспортных коридоров с мультимодальными системами и интермодальными технологиями доставки грузов, обеспечивающее достижение экономических, социальных и экологических целей, стоящих перед государствами. Для транспортной системы России, претендующей на продвижение по своей территории транзитных грузопотоков, решение перечисленных задач может быть реализовано путём формирования контрейлерной технологии. Необходимым условием организации эффективных контрейлерных перевозок в региональном и международном сообщениях является систематизация параметров и оценка технической совместимости задействованного подвижного состава.

Методы и модели. В работе использован системный подход для представления контрейлерной технологии как сложной технической системы, состоящей из автомобильных транспортных средств, отечественного и зарубежного железнодорожного подвижного состава, взаимодействующих в интермодальных терминалах. Для описания концептуальной схемы рассматриваемой системы использована ER-модель.

Результаты. Обоснованы и систематизированы параметры автомобильного и железнодорожного подвижного состава, определено их взаимовлияние на уровне совместимости их технико-эксплуатационных параметров при организации внутренних и международных контрейлерных перевозок. Систематизация, структурирование, хранение и актуализация параметров подвижного состава осуществляется с использованием базы данных «Определение базовых параметров подвижного состава контрейлерных систем доставки грузов», разработанной в среде Microsoft Access.

Заключение. Разработанная система параметров позволяет оценить техническую совместимость автомобильного и железнодорожного подвижного состава участников контрейлерных перевозок, а также может быть использована при унификации интермодальных транспортных единиц и гармонизации габаритно-весовых ограничений на сети автомобильных и железных дорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспорт, мультимодальная перевозка, комбинированная перевозка, интермодальная перевозка, интермодальная транспортная единица (ИТЕ), автомобильно-железнодорожная перевозка, контрейлерная перевозка, автомобильное транспортное средство, железнодорожный подвижной состав, параметр, база данных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают искреннюю благодарность д-ру техн. наук А.Н. Рахмангулову, проф. кафедры «Логистика и управление транспортными системами» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» за помощь в визуализации базы данных.

Поступила 12.02.2020, принята к публикации 21.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Цыганов А.В., Осинцев Н.А. Система параметров подвижного состава интермодальной контрейлерной технологии. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17(2): 262-272. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272>

© Цыганов А.В., Осинцев Н.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272>

THE SYSTEM OF ROLLING-STOCK'S PARAMETERS OF INTERMODAL PIGGYBACK TRANSPORTATION

Aleksandr V. Tsyganov, Nikita A. Osintsev
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The priority area of transport systems development is the formation of transport corridors with multimodal systems and intermodal cargo delivery technologies, ensuring the achievement of economic, social and environmental goals facing the countries. For the transport system of Russia, which claims to advance transit cargo flows through its territory, the solution to the above problems can be achieved by organization of the piggyback transportation. A necessary condition for the organization of effective piggyback transportation in domestic and international traffics is the systematization of parameters and the assessment of technical compatibility of the involved rolling-stock.

Methods and models. A systems approach is used to represent piggyback transportation as a complex technical system consisting of road vehicles, domestic and foreign railway rolling-stock interacting in intermodal terminals. The ER-model is used to describe the conceptual scheme of the piggyback system.

Results. The parameters of the road and railway rolling-stock are justified and systematized, their mutual influence is determined at the level of compatibility of their technical and operational parameters in the organization of domestic and international piggyback transportation. Systematization, structuring, storing and updating of rolling-stock parameters are carried out using the database «Determining the rolling-stock basic parameters of piggyback delivery systems» developed in Microsoft Access.

Conclusion. The developed system of parameters allows to assess technical compatibility of road and railway rolling-stock of the countries participating in piggyback transportation, and can also be used for unification of intermodal transport units and harmonization of the overall weight restrictions on the road and railway networks.

KEYWORDS: transport, multimodal transport, combined transport, intermodal transport, intermodal transport unit (ITU), road-rail transport, piggyback, road vehicle, railway rolling-stock, parameter, data base.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their sincere gratitude to Dr. A. Rakhmangulov, Professor at the Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia for assistance with visualization of database.

Submitted 12.02.2020, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Tsyganov A.V., Osintsev N.A. The system of rolling-stock's parameters of intermodal piggyback transportation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 262-272. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272>

© Tsyganov A.V., Osintsev N.A.



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

ВВЕДЕНИЕ

Мировая экономика характеризуется ростом внешнеторгового оборота между странами. Глобализация товарообмена вызвана специализацией стран по производству конкретных видов сырья и готовой продукции. Центрами торговли в настоящее время выступают Соединённые Штаты Америки, Китай и страны Европейского союза¹ [1]. Их территориальная удалённость требует развития существующих и формирования новых транспортных связей, в том числе проходящих по территории России. Качественное обслуживание национальных и транзитных грузопотоков обеспечивается их концентрацией на магистралях, имеющих технико-технологическое обустройство с достаточной пропускной и провозной способностями². В качестве таких магистралей в настоящее время выступают транспортные коридоры.

Международный [2, 3] и отечественный опыт свидетельствует о ключевой роли государств в формировании транспортных коридоров. Это обусловлено высокой капиталоемкостью транспортной инфраструктуры и необходимостью интеграции транспортных систем стран. Решение данных задач определено в важнейших международных и национальных документах. Для стран Евросоюза подобными документами являются: «Концепция трансъвропейской транспортной сети»³ и «Белая книга»⁴, для Китая – инициатива «Один пояс – один путь»⁵, для России – «Транспортная стратегия Российской Федерации»⁶ и «Стратегия инновационного развития Российской Федерации»⁷. Реализация управленческих решений, сформированных в перечисленных

документах, преследует цель устойчивого развития транспортных систем и формирования мировой транспортной системы [1]. Примером являются страны Евросоюза, в которых наличие единого экономического пространства и развитость интеграционных процессов между странами способствует стабильному росту объемов перевозок, в том числе и в международном сообщении.

В настоящее время транспортная политика развитых стран сосредоточена на решении общественно-экономических и экологических задач⁸ [4]. Одним из приоритетов является снижение объема перевозки грузов автомобильным транспортом, оказывающим наибольшее негативное экологическое воздействие на окружающую среду. Более того, имеется устойчивая тенденция возрастания воздействия, вызванная, прежде всего, ростом автомобилизации в развивающихся странах с сохранением использования классических видов топлива. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата автомобильным транспортом в атмосферу выбрасывается около 1,7 мегатонн двуокиси углерода (CO₂) в год, что превышает совокупные объемы выбросов данного парникового газа всеми остальными видами транспорта. Кроме того, автомобильный транспорт является наиболее энергоёмким из всех видов транспорта – на его долю приходится 85% энергозатрат транспортной отрасли [5]. С учётом этого в странах Евросоюза к 2030 году запланировано перенести 30% автомобильных грузовых перевозок протяжённостью свыше 300 км на железнодорожный или внутренний водный транспорт, а к 2050 году – более 50% [4].

¹ International Trade Centre statistics URL <http://www.intracen.org/> (дата обращения: 25.11.2019).

² Герами В.Д. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики: учебник и практикум / В.Д. Герами, А.В. Колик. М.: Юрайт, 2015. 510 с. ISBN 978-5-9916-4792-2.

³ Regulation (EU) No 1315/2013 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32013R1315> (дата обращения: 24.12.2019).

⁴ White paper on Transport. Roadmap to a Single Transport Area – Towards a Competitive and Resource-Efficient Transport System: European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2011. 32 p.

⁵ One Belt One Road Initiative. URL <http://politics.people.com.cn/n/2014/0811/c1001-25439028.html> (дата обращения: 10.06.2018).

⁶ Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. URL <http://docs.cntd.ru/document/420202382> (дата обращения: 20.12.2018).

⁷ Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. URL <http://docs.cntd.ru/document/902317973/> (дата обращения: 13.12.2019).

⁸ White paper on Transport. Roadmap to a Single Transport Area – Towards a Competitive and Resource-Efficient Transport System: European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2011. 32 p.

Формирование «экологически чистых» транспортных систем на сегодняшний момент идёт по пути развития мультимодальных систем доставки грузов, основанных на последовательном или параллельном продвижении грузопотоков несколькими видами транспорта. Дополнительный эффект возникает при использовании внутри мультимодальной системы интермодальной технологии. В основу данной технологии положена идея исключения операций перевалки груза в другую ёмкость при его передаче с одного вида транспорта на другой⁹. Реализация идеи заключается в размещении груза в интермодальной транспортной единице (далее ITE), способной к перевозке несколькими видами транспорта в пределах всей мультимодальной системы (цепи поставки). По информации Международного союза автомобильно-железнодорожных комбинированных перевозок (UIRR), наиболее распространёнными ITE являются контейнеры, съёмные кузова и полуприцепы. Доля их использования компаниями-членами UIRR составляет около 80% на всех маршрутах перевозок в странах Евросоюза¹⁰.

Разновидностью интермодальных технологий с участием автомобильного и железнодорожного видов транспорта является контрейлерная технология. Данная технология позволяет снизить логистические издержки [6], повысить гибкость управления потоками в цепях поставок [4], уменьшить негативное воздействие транспорта на окружающую среду [7], а также стимулирует развитие «зелёной» логистики [8]. Например, опыт стран Евросоюза показывает, что использование контрейлерной технологии обеспечивает сокращение годовых экологических расходов на 200 млн евро, а затрат на содержание автомобильных дорог – до 500 млн евро [9].

Таким образом, формирование в транспортных коридорах мультимодальных систем доставки с интермодальными технологиями выступает альтернативным и конкурентным решением унимодальным системам, основанным на использовании одного вида транспорта в продвижении грузопотоков. Функционирование столь сложных транспортных систем основано, в частности, на обеспечении координации и взаимодействии различных видов транспорта.

В связи с этим контрейлерные перевозки в России к настоящему времени организованы только на уровне пилотных проектов. Это вызвано отсутствием комплексного подхода к внедрению национальной контрейлерной технологии. К наиболее важным задачам, не имеющим к настоящему времени полного решения, относятся: создание терминальной инфраструктурной сети и парка специализированного железнодорожного подвижного состава, разработка нормативно-правовых документов и тарифной политики, а также интеграция национальной контрейлерной технологии в зарубежные транспортные системы [10, 11]. При обслуживании национальных и международных грузопотоков особую актуальность представляет задача согласования параметров автомобильных транспортных средств с параметрами отечественного и зарубежного железнодорожного подвижного состава. Систематизация параметров позволит проводить качественную проверку их технической совместимости при организации контрейлерных перевозок.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ КОНТРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В результате выполненного анализа [12] выделено шесть предметных направлений исследований интермодальной контрейлерной технологии: обобщение (литературные обзоры и практика реализации контрейлерных перевозок); политика (нормативно-правовое регулирование, роль государства и международных организаций в развитии мультимодальных и интермодальных технологий); технологии (анализ существующих и разработка новых транспортных технологий); инфраструктура (развитие транспортных коридоров, путей сообщения, терминалов и других инфраструктурных объектов); экология и устойчивое развитие (оценка влияния транспорта на окружающую среду); экономика (оценка инвестиций в развитие контрейлерных перевозок, их конкурентоспособность, эффективность). Отмечается, что отсутствие комплексного учёта параметров подвижного состава, задействованного в контрейлерных перевозках, снижает качество оценки совместимости транспортных средств и его выбора при организации перевозок.

⁹ Троицкая Н. А. Мультимодальные системы транспортировки и интермодальные технологии: учебное пособие / Н.А. Троицкая, А.Б. Чубуков, М.В. Шилимов. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 336 с. ISBN 978-5-7695-4690-7.

¹⁰ International Union for Road-Rail Combined Transport. URL <http://www.uirr.com/en/road-rail-ct/ct-offers/unaccompanied-services.html> (дата обращения: 04.12.2019).

В исследовании параметров подвижного состава интермодальной контрейлерной технологии авторы¹¹ акцентируют внимание на связи габаритного размера автомобильных транспортных средств и высоты уровня пола железнодорожных вагонов с габаритом погрузки. В работе [4] наиболее важными обозначены параметры ИТЕ: тип, габаритные размеры, масса и некоторые конструктивные особенности, влияющие на габаритные и весовые параметры автопоездов, а также на технологию перегрузки ИТЕ и возможность установки их в штабель. В работах¹² [12] исследовано влияние ряда параметров автомобильных транспортных средств (тип, габаритные размеры, масса) на величину динамических сил, возникающих при перевозке в железнодорожном подвижном составе и параметры средств крепления. Исследования [13, 14] показали, что наличие значительного количества и неоднородность ИТЕ, характеризующихся прежде всего типом и размером, приводит к сложности их выбора грузоотправителями и требует дальнейшей стандартизации транспортных единиц. В работах [15, 16] рассмотрено влияние типа ИТЕ на технико-эксплуатационные характеристики зарубежных контрейлерных систем и приведено сравнение этих систем по технико-экономическим параметрам. Анализ технологий перегрузки и установление взаимосвязи с конструкцией полуприцепов и сопровождаемостью перевозки выполнен в работах [17, 18]. В исследовании [19] установлена взаимосвязь веса поезда, определяемого типом перевозимых ИТЕ, с его длиной и скоростью движения. В работах [20, 21] приводятся параметры автомобильных транспортных средств, влияющие на эксплуатационные расходы функционирования интермодальных терминалов. Авторы [22] в качестве основных параметров оценки варианта организации мультимодальных перевозок используют срок доставки, расстояние и стоимость перевозки. В работе¹³ авторы выделяют постоянные и переменные параметры мультимодальных систем. К постоянным параметрам отнесены транспортно-эксплуатационные затраты, гру-

зоподъемность подвижного состава и ИТЕ, расстояние перевозки, а к переменным – количество вагонов, масса брутто поезда и количество ИТЕ.

Недостатком большинства существующих подходов к выбору и расчёту параметров интермодальной контрейлерной технологии является отсутствие комплексного учёта и систематизации параметров автомобильного и железнодорожного подвижного состава, влияющих на организацию контрейлерных перевозок. Расширение многообразия ИТЕ и подвижного состава приводит к затруднению и замедлению операций в терминалах, усложнению подбора подвижного состава для транспортировки ИТЕ, а также росту затрат на их техническое обслуживание. Решение задачи систематизации параметров подвижного состава для оценки их технической совместимости является необходимым условием организации эффективных контрейлерных перевозок грузов во внутреннем и международном сообщении.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ КОНТРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Согласно¹⁴ контрейлерные перевозки – перевозки по определённым маршрутам автопоездов, автомобилей, автоприцепов, полуприцепов и съёмных кузовов в гружёном или порожнем состоянии в составе контрейлерных поездов. С позиций системного подхода авторами настоящей статьи интермодальная контрейлерная технология рассматривается как сложная техническая система, состоящая из автомобильных транспортных средств, железнодорожного подвижного состава и зарубежных контрейлерных технологий [15, 16], взаимодействующих в терминалах. Значительное количество технико-эксплуатационных характеристик элементов является существенным ограничением формирования и функционирования интермодальной контрейлерной технологии в мультимодальной системе доставки.

¹¹ Концепция организации контрейлерных перевозок на «пространстве 1520». М.: Изд-во ОАО «РЖД», 2011. 149 с.

¹² Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. М.: Юридическая фирма «Юртранс», 2003. 544 с.

¹³ Транспорт в товарообмене между Европой и Азией / под ред. Мачея Миндура. Варшава–Радом: Ин-т технологии эксплуатации, 2011. 531 с. ISBN 978-83-7789-012-7.

¹⁴ Концепция организации контрейлерных перевозок на «пространстве 1520». М.: Изд-во ОАО «РЖД», 2011. 149 с.

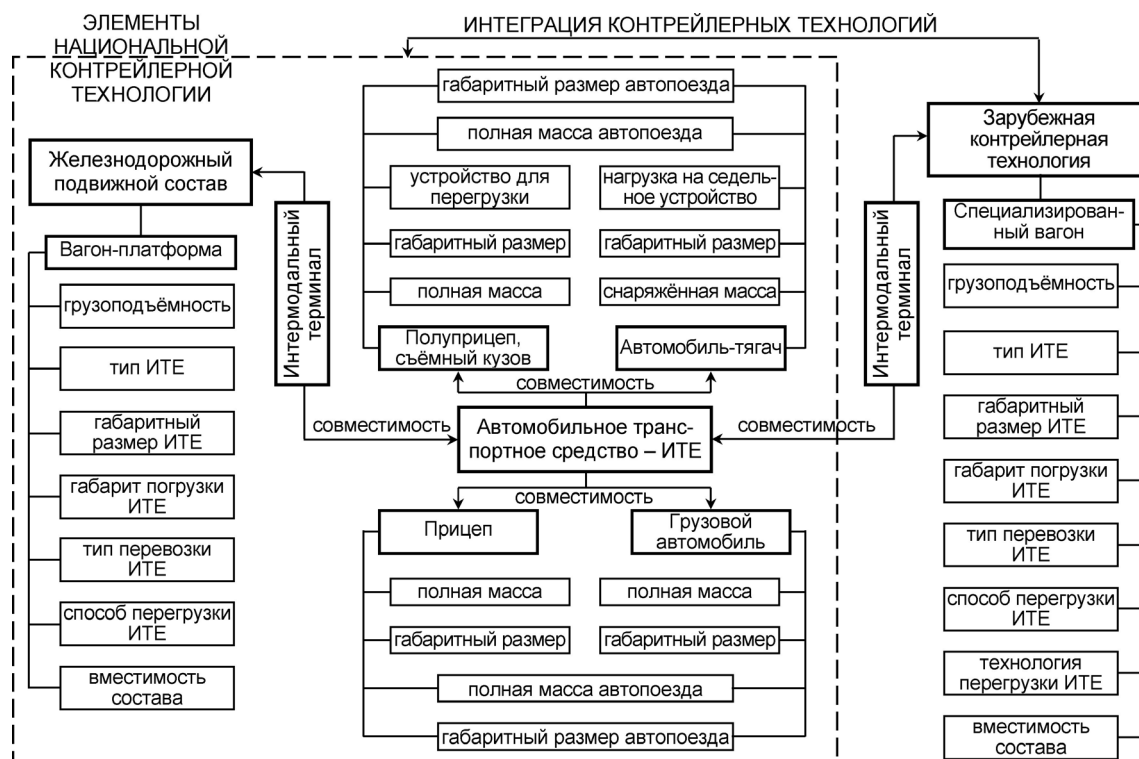


Рисунок 1 – Схема взаимосвязи параметров подвижного состава интермодальной контрейлерной технологии (схема разработана авторами)

Figure 1 – Scheme of the intermodal piggyback transportation rolling-stock parameters interrelation (designed by the authors)

Это обусловлено, в частности:

- широкой номенклатурой типов и моделей автомобильных транспортных средств и ИТЕ, отличающихся конструктивными особенностями, грузоместимостью, габаритными размерами, массой и другими параметрами;
- разновидностями моделей специализированного железнодорожного подвижного состава, имеющих аналогичные отличия технических параметров;
- наличием различных действующих зарубежных контрейлерных технологий, отличающихся технологией погрузки/выгрузки автомобильных транспортных средств, типами обслуживаемых ИТЕ, способом формирования контрейлерных поездов и другими технико-эксплуатационными параметрами.

Таким образом, рассматриваемая техническая система характеризуется значительным многообразием вариантов формирования интермодальной контрейлерной технологии как на уровне оказания логистических услуг крупным и мелким перевозчикам, так и на уровне выбора контрейлерной технологии, включающей создание терминальной инфраструктурной сети и парка специализированного железно-

рожного подвижного состава. Это определяет необходимость детализации и обоснования параметров элементов рассматриваемой технической системы. В работе даны три варианта организации контрейлерной перевозки: 1) несопровождаемая – перевозка полуприцепа, съёмного кузова или прицепа, рассматриваемых в работе как ИТЕ; 2) сопровождаемая – перевозка автопоезда или грузового автомобиля, также рассматриваемых в работе как ИТЕ; 3) международная – перевозка ИТЕ посредством национальной контрейлерной технологии с последующей их передачей в зарубежную контрейлерную технологию (и обратно). Первый и второй варианты предусматривают перевозку ИТЕ определённого типа посредством национальной контрейлерной технологии в пределах территории России. Структура технической системы с базовыми параметрами элементов приведена на рисунке 1.

Определим связи параметров элементов рассматриваемой технической системы. При контрейлерной перевозке полуприцепа с его последующей доставкой грузополучателю автомобилем-тягачом оператора (1-й рассматриваемый вариант) требуется проверка

совместимости полуприцепа с тягачом. Параметрами проверки являются: полная масса полуприцепа, габаритный размер полуприцепа, собственная масса тягача, допустимая нагрузка на опорно-сцепное устройство тягача, габаритный размер тягача, полная масса автопоезда, габаритный размер автопоезда. Аналогичная проверка требуется при перевозке съёмного кузова автомобилем-тягачом или прицепа грузовым автомобилем оператора.

При контрейлерной перевозке автопоезда, грузового автомобиля и других ИТЕ (1-й и 2-й рассматриваемые варианты) требуется проверка совместимости ИТЕ с железнодорожным подвижным составом. Параметрами проверки являются: грузоподъёмность вагона-платформы, тип ИТЕ, габаритный размер, габарит погрузки, тип перевозки (сопровождаемая/несопровождаемая), способ перегрузки (параллельная/последовательная), вместимость железнодорожного состава.

При контрейлерной перевозке, предусматривающей взаимодействие с зарубежной контрейлерной технологией (3-й рассматриваемый вариант) требуется проверка совместимости ИТЕ с определённой контрейлерной технологией. Параметрами проверки являются: грузоподъёмность специализированного вагона, тип ИТЕ, габаритный размер, габарит погрузки, тип перевозки, способ перегрузки, технология перегрузки (горизонтальная/вертикальная), совместимость железнодорожного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ КОНТРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Интермодальная контрейлерная технология обладает значительным количеством технико-эксплуатационных параметров, характеризующих её элементы. Поэтому требуется удобный инструментарий проверки совместимости параметров автомобильных транспортных средств с параметрами отечественного и зарубежного железнодорожного подвижного состава. Обработка массива данных возможна посредством применения информационных технологий, обеспечивающих систематизацию, структурирование, хранение и своевременную актуализацию значительного количества параметров элементов рассма-

триваемой технической системы. В качестве решения данной задачи предлагается использование разработанной авторами статьи базы данных¹⁵. Основу базы данных составляет информация официальных сайтов компаний-производителей контрейлерных систем доставки, интермодальных транспортных единиц, железнодорожного подвижного состава, а также нормативно-правовых документов. База данных выполняет следующие основные взаимосвязанные функции:

- вывод информации о параметрах конкретных моделей/типов ИТЕ и отечественного железнодорожного подвижного состава с оценкой их совместимости при организации национальных контрейлерных перевозок;
- вывод информации о параметрах конкретных моделей/типов ИТЕ и зарубежных контрейлерных технологий с оценкой их совместимости при организации международных контрейлерных перевозок;
- вывод информации о вариантах формирования интермодальной контрейлерной технологии с расчётом провозной платы при организации контрейлерной перевозки по заданным параметрам.

База данных включает в себя следующие объекты: взаимосвязанные таблицы данных; формы актуализации данных; запросы на просмотр информации; отчёты, обеспечивающие вывод результатов запросов на печать. Содержание таблиц данных о параметрах подвижного состава интермодальной контрейлерной технологии в форме ER-диаграммы приведено на рисунке 2.

Параметры подвижного состава интермодальной контрейлерной технологии. **Полуприцеп, съёмный кузов (прицеп):** A_1 – модель; A_2 – схема общего вида; A_3 – страна-производитель; A_4 – тип; A_5 – габаритный размер: длина/ширина/высота; A_6 – объём кузова; A_7 – номинальная грузоподъёмность; A_8 – собственная/полная масса; A_9 – типоразмер; A_{10} – габарит погрузки; A_{11} – тарифный класс. **Автомобиль-тягач (грузовой автомобиль):** B_1 – модель; B_2 – схема общего вида; B_3 – страна-производитель; B_4 – тип; B_5 – габаритный размер: длина/ширина/высота; B_6 – номинальная грузоподъёмность; B_7 – снаряжённая/полная масса; B_8 – допустимая нагрузка на опорно-сцепное устройство тягача; B_9 – объём кузова автомобиля; B_{10} – максимальная скорость движения; B_{11} – габарит погрузки; B_{12} – тарифный класс.

¹⁵ Федорина А.В., Осинцев Н.А., Цыганов А.В. Определение базовых параметров подвижного состава контрейлерных систем доставки грузов // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621248. 2016.

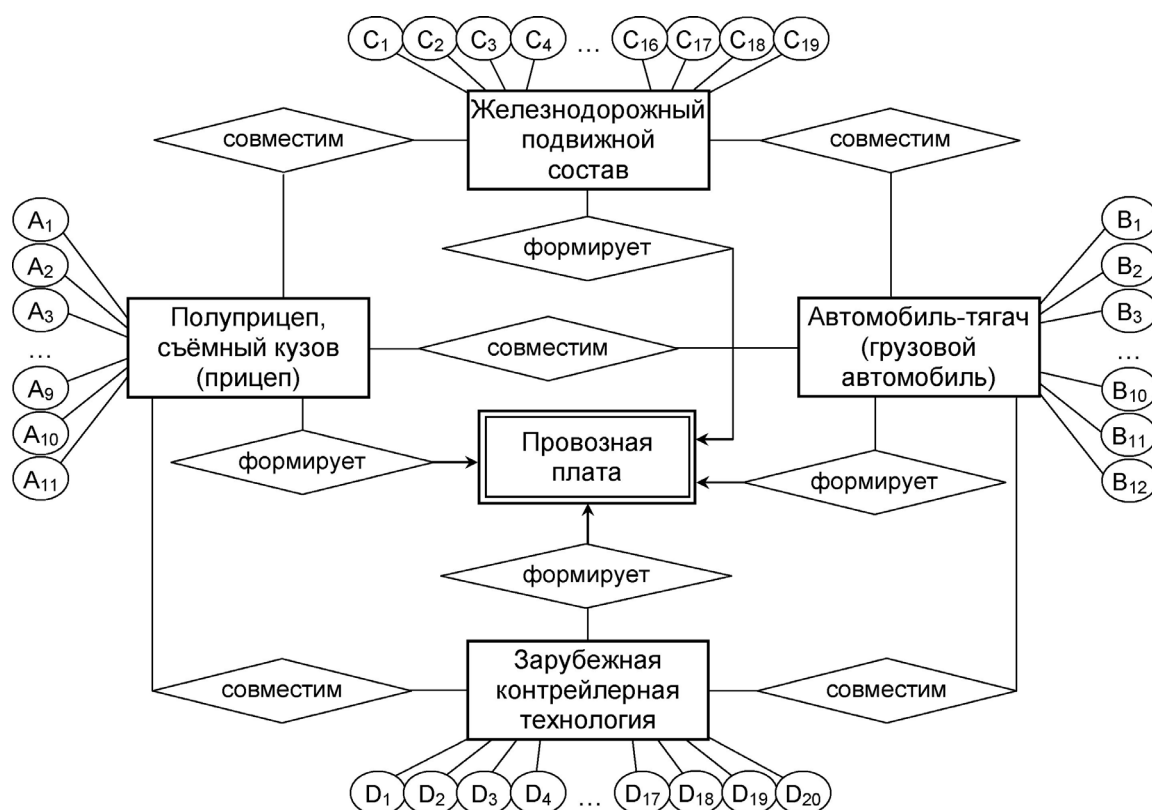


Рисунок 2 – ER-диаграмма базы данных интермодальной контейнерной технологии (схема разработана авторами)

Figure 2 – ER-diagram of the intermodal piggyback transportation data base (designed by the authors)

Железнодорожный подвижной состав: C_1 – модель вагона-платформы; C_2 – схема общего вида; C_3 – страна-производитель; C_4 – грузоподъёмность; C_5 – допустимая нагрузка на ось; C_6 – высота уровня пола от головки рельс; C_7 – габаритный размер пола: длина/ширина; C_8 – конструкционная скорость движения; C_9 – габарит подвижного состава; C_{10} – ширина железнодорожной колеи; C_{11} – тип ИТЕ; C_{12} – габаритный размер ИТЕ; C_{13} – габарит погрузки ИТЕ; C_{14} – количество упоров крепления: колёс/ИТЕ; C_{15} – тип перевозки ИТЕ; C_{16} – способ перегрузки ИТЕ; C_{17} – количество вагонов в составе контейнерного поезда; C_{18} – возможность подключения электропитания; C_{19} – тарифный класс. **Зарубежная контейнерная технология:** D_1 – наименование; D_2 – страна-производитель/эксплуатант; D_3 – схема общего вида специализированного вагона; D_4 – грузоподъёмность; D_5 – допустимая нагрузка на ось; D_6 – высота уровня пола от головки рельс; D_7 – габаритный размер пола: длина/ширина; D_8 – конструкционная скорость движения; D_9 – габарит подвижного состава; D_{10} – ширина железнодорожной колеи; D_{11} – тип

ИТЕ; D_{12} – габаритный размер ИТЕ; D_{13} – габарит погрузки ИТЕ; D_{14} – тип перевозки ИТЕ; D_{15} – способ перегрузки ИТЕ; D_{16} – технология перегрузки ИТЕ; D_{17} – необходимость в персонале при перегрузке ИТЕ; D_{18} – количество вагонов в составе контейнерного поезда; D_{19} – тип терминала; D_{20} – тарифная ставка.

Таблицы данных содержат числовые и текстовые значения параметров подвижного состава интермодальной контейнерной технологии. Таблица «Автомобильные транспортные средства» характеризует ИТЕ с детализацией по автомобилям-тягачам, полуприцепам, съёмным кузовам, грузовым автомобилям и прицепах. Данная таблица позволяет проверять совместимость моделей/типов полуприцепов и съёмных кузовов с моделями автомобилей-тягачей, а также совместимость моделей прицепов с моделями грузовых автомобилей. Таблица «Железнодорожный подвижной состав» содержит информацию о параметрах железнодорожного подвижного состава и имеет связь с предыдущей таблицей. Пример информационного содержания таблицы приведён на рисунке 3.

Железнодорожный подвижной состав													
Код	Модель платформы	Схема осей	Длина п	Длина р	База	Высота	Высота	Длина по	Ширина	Грузополь	Масса тары	Конструкт	Количество
1	Модель 13-4095	Витмар Image	22520	21300	17800	813	1268	21176	2550	48000	28000	120	8
2	Модель 13-9009	Витмар Image	25520	24500	18500	700	1200	24300	2640	60000	33500	120	8
3	Sdgenqss-w	Витмар Image	25820		20000			24880	3200	58500	31200	90	
4	Модель 13-9961	не Paintbrush	21440	20280	15800	700	1100	21440	3200	55500	30500	120	8
Код	Модель автомобильного транспортного средства	Тип автомобильного транспортного средства											
1	КамАЗ 65116-A4	Сельскохозяйственный тягач											
2	MAN TGX 18.400	Сельскохозяйственный тягач											
3	КамАЗ 5490	Сельскохозяйственный тягач											
4	Renault 500.19 T HT1100	Сельскохозяйственный тягач											
5	MAZ 5316X5-410-001	Бортовой автомобиль											
6	Hyundai HD 250 (Борт)	Бортовой автомобиль											
7	Vokvo FL	Бортовой автомобиль											
8	КамАЗ 43118-46	Бортовой автомобиль											
9	КамАЗ 65207	Бортовой автомобиль											
10	Модель 13-9961	Прицеп											
11	СЗАП-8551-02M	Прицеп											
12	Автотрейдинг ОРА 18Т	Прицеп											
13	MAZ 870100 3010	Прицеп											
14	ANNABURGER LT-9 02	Прицеп											
15	НЕФАЗ-93344-0000013-02	Полуприцеп											
16	ГАЗА ППЦА 96222-012 удлиненная	Полуприцеп											
17	MAZ 938020 016	Полуприцеп											
18	MAZ 931010 3011	Полуприцеп											
19	Krone City Liner SER 10 zLNZ-S	Полуприцеп											
20	Fruehauf MaxiSpeed LIFTOP MEGA	Полуприцеп											
21	Тонар 974601-0000010	Полуприцеп											
71	КамАЗ 5460 - MAZ-975830-3021	Автопоезд (тягач-полуприцеп)											
72	КамАЗ 5460 - Тонар 974611-0000021	Автопоезд (тягач-полуприцеп)											
73	КамАЗ 5460 - Krone City Liner SER 10 zLNZ-S	Автопоезд (беспроекторный)											

Рисунок 3 – Информационное содержание таблицы «Железнодорожный подвижной состав» (разработано авторами в среде Microsoft Access)

Figure 3 – Information content of the table “Railway rolling-stock” (designed by the authors in Microsoft Access)

Наличие связи между таблицами позволяет проверять совместимость моделей/типов ИТЕ с моделями железнодорожных вагонов-платформ. Параметры действующих зарубежных контейнерных технологий, отражающие их полную технико-технологическую характеристику, представлены в таблице «Зарубежные контейнерные системы», имеющей связь с таблицей «Автомобильные транспортные средства». Это позволяет проверять совместимость моделей/типов ИТЕ с зарубежными контейнерными технологиями. Таблица «Провозная плата» обеспечивает расчёт величины платы за перевозку по заданным параметрам: тип ИТЕ, грузёное/порожнее состояние ИТЕ, расстояние перевозки, тарифная схема и др. Это позволяет проводить сравнение вариантов формирования интермодальной контейнерной технологии, а также сопоставлять их с альтернативными технологиями доставки грузов по критерию совокупных транспортных затрат.

Формы актуализации базы данных используются для уточнения значений параметров, их оперативного добавления при появлении новых моделей/типов ИТЕ, железнодорожного подвижного состава и зарубежных контейнерных технологий. Также имеется форма для внесения изменений к действующим размерам тарифных ставок контейнерных перевозок. Формы обеспечивают автоматическую интеграцию вводимых значений в соответствующие таблицы данных. Используя элементы интерфейса базы данных, реализуется

возможность выполнять запросы на просмотр интересующей информации. Для удобства вывода результатов запросов на печать они представлены в форме отчётов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основу современного этапа совершенствования транспортных систем развитых стран составляет политика интермодализма, предусматривающая углубление взаимодействия различных видов транспорта и создание интегрированной транспортной системы. Использование данного подхода позволяет повысить качество оказания транспортных услуг и достичь решения экономических, социальных и экологических задач, стоящих перед транспортной отраслью. В частности, предусматривается снижение доли участия автомобильного транспорта в перевозочной деятельности за счёт расширения его взаимодействия с железнодорожным транспортом. В России это может быть реализовано путём формирования контейнерной технологии. Помимо обслуживания национальных грузопотоков данная технология должна обеспечить продвижение грузов в международном сообщении, что определяет необходимость её интеграции в зарубежные контейнерные технологии. Поэтому при её формировании актуальной представляется задача технической совместимости подвижного состава.

Предлагаемая авторами настоящей статьи система параметров подвижного состава является основой при проектировании и функци-

онировании интермодальной контрейлерной технологии в России. Учёт параметров будет способствовать унификации интермодальных транспортных единиц и гармонизации соответствующих стандартов, гармонизации габаритных и весовых ограничений на сети автомобильных и железных дорог, а также оценке технической совместимости автомобильного и железнодорожного подвижного состава участников контрейлерных перевозок. Разработанная база данных может быть использована транспортно-экспедиционными компаниями и провайдерами логистических услуг при планировании и организации мультимодальных перевозок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sustainable development of transport systems for cargo flows on the East-West direction / Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Kopylova O. // *Transport systems and delivery of cargo on East-West routes: Studies in Systems Decision and Control*. 2018. vol. 156. pp. 3–69. DOI: 10.1007/978-3-319-78295-9_1.
2. Jaržemskienė I. The evolution of intermodal transport research and its development issues // *Transport*. 2007. vol. 12(4). pp. 296–306.
3. Ulfbeck V. Multimodal transports in the United States and Europe – global or regional liability rules // *Tulane Maritime Law Journal*. 2009. vol. 34(1). pp. 37–90.
4. Колик А.В. Комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки в цепях поставок. М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2018. 301 с. ISBN 978-5-94385-143-8.
5. Осинцев Н.А., Казармщикова Е.В. Факторы устойчивого развития транспортно-логистических систем // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2017. Т.7. №1. С. 13–21. DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21.
6. Panayides P.M. Economic organization of intermodal transport // *Transport Reviews*. 2002. vol. 22(4). pp. 401–414. DOI: 10.1080/01441640210124523.
7. Stinga (Cristea) V.-G. Intermodal transport – a way of achieving sustainable development // *Constanta Maritime University Annals*. 2014. vol. 22. pp. 145–148.
8. Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation / J.T.d.M. Pinto, O. Mistage, P. Bilotta, E. Helmers // *Environmental Development*. 2018. vol. 25. pp. 100–110. DOI:10.1016/j.envdev.2017.07.005.
9. Ключко Р. Мимо колеи // *Международные автомобильные перевозки*. 2012. № 2. С. 54–58.
10. Кряжев А.Н. Организация регулярного контрейлерного сообщения на территории России // *Транспорт Российской Федерации*. 2016. №1(62). С. 18–21.
11. Цыганов А.В. PEST-анализ организации контрейлерных перевозок в России // *Инженерный вестник Дона*. 2019. №2(53). С. 18. URL <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5717>.
12. Tsyganov A. Loads of road vehicles during piggyback transportation // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019. vol. 298. p. 00109. DOI: 10.1051/mateconf/201929800109.
13. Bontekoning Y.M., Macharis C, Trip JJ (2004) Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*; 38(1): 1–34. DOI: 10.1016/j.tra.2003.06.001.
14. Gharehgozli A., Vries H. de, Decrauw S. The role of standardisation in European intermodal transportation // *Maritime Business Review*. 2019. vol. 4(2). pp. 151–168. DOI: 10.1108/MABR-09-2018-0038.
15. Siroky J. The trends of road trailers systems for railways // *Perner's Contacts*. 2012. vol. 7(4). pp. 137–151.
16. Pyza D. Transport technologies in intermodal transport // *Transportation Overview – Przegląd Komunikacyjny*. 2019. No. 4. pp. 1–17. DOI: 10.35117/A_ENG_19_04_01.
17. Li C., Yang G., Sun X. Transshipment equipments for road-rail intermodal transport // *Advanced Materials Research*. 2015. vol. 1065–1069. pp. 3377–3380. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.3377.
18. Gronalt M., Schultze R-C., Posset M. Intermodal transport – basics, structure, and planning approaches. *Sustainable Transportation and Smart Logistics: Decision-making Models and Solutions*. Amsterdam: Elsevier. 2018. pp. 123–149. DOI: 10.1016/B978-0-12-814242-4.00005-3.
19. Janic M (2008) An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008. vol. 42(10). pp. 1326–1339. DOI: 10.1016/j.tra.2008.06.008.
20. Monios J., Bergqvist R. *Intermodal Freight Transport & Logistics*. Boca Raton, FL: CRC Press. 2017. 274 p. ISBN: 978-1-4987-8512-9.
21. Tadić S., Krstić M., Brnjac N. Selection of efficient types of inland intermodal terminals. *Journal of Transport Geography*. 2019. vol. 78. pp. 170–180. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.06.004.
22. Kornilov S.N., Deev E.A., Lukyanov J.I. Optimization method of the multimodal transportation on the base of Dijkstra's algorithm // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. vol. 272(3). p. 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032017.

REFERENCES

1. Sustainable development of transport systems for cargo flows on the East-West direction / Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Kopylova O. *Transport systems and delivery of cargo on East-West routes: Studies in Systems Decision and Control*. 2018; 156: 3–69. DOI: 10.1007/978-3-319-78295-9_1.
2. Jaržemskienė I. The evolution of intermodal transport research and its development issues. *Transport*. 2007; vol. 12(4): 296–306.
3. Ulfbeck V. Multimodal transports in the United States and Europe – global or regional liability rules. *Tulane Maritime Law Journal*. 2009; 34(1): 37–90.
4. Kolik A.V. *Kombinirovannye zheleznodorozhno-avtomobil'nye perevozki v cepyah postavok* [Com-

bined rail and road transport in supply chains]. Moscow, Izdatel'stvo «Tekhpolygoncentr», 2018: 301. ISBN 978-5-94385-143-8 (in Russian).

5. Osintsev N.A., Kazarmshchikova E.V. Faktory ustojchivogo razvitiya transportno-logisticheskikh sistem [Factors of sustainable development of transport and logistics systems]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*. 2017; 7. no 1: 13-21. DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21 (in Russian).

6. Panayides P.M. Economic organization of intermodal transport. *Transport Reviews*. 2002; 22(4): 401–414. DOI: 10.1080/01441640210124523.

7. Stinga (Cristea) V.-G. Intermodal transport – a way of achieving sustainable development. *Constanta Maritime University Annals*. 2014; 22: 145–148.

8. Pinto J.T.d.M., Mistage O., Bilotta P., Helmers E. Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development*. 2018; 25: 100–110. DOI:10.1016/j.envdev.2017.07.005.

9. Klochko R. Mimo kolei [Past the track]. *Mezhdunarodnye avtomobil'nye perevozki*. 2012; 2: 54–58 (in Russian).

10. Kryazhev A.N. Organizaciya regul'yarnogo kontejlernogo soobshcheniya na territorii Rossii [Organization of regular piggyback communication in Russia]. *Transport of the Russian Federation*. 2016; 1(62): 18-21 (in Russian).

11. Tsyganov A.V. PEST-analiz organizacii kontejlernykh perevozok v Rossii [PEST Analysis of the organization piggyback transportation in Russia]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2019; 2(53): 18. URL <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5717> (in Russian).

12. Tsyganov A. Loads of road vehicles during piggyback transportation. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019; 298: 00109. DOI: 10.1051/mateconf/201929800109.

13. Bontekoning Y.M., Macharis C, Trip JJ (2004) Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. vol. 38(1). pp. 1–34. DOI: 10.1016/j.trra.2003.06.001.

14. Gharehgozli A., Vries H. de, Decrauw S. The role of standardisation in European intermodal transportation. *Maritime Business Review*. 2019; 4(2): 151–168. DOI: 10.1108/MABR-09-2018-0038.

15. Siroky J. The trends of road trailers systems for railways. *Perner's Contacts*. 2012; 7(4):137-151.

16. Pyza D. Transport technologies in intermodal transport. *Transportation Overview – Przegląd Komunikacyjny*. 2019; 4: 1–17. DOI: 10.35117/A_ENG_19_04_01.

17. Li C., Yang G., Sun X. Transshipment equipments for road-rail intermodal transport. *Advanced Materials Research*. 2015; 1065–1069: 3377–3380. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.3377.

18. Gronalt M., Schultze R.-C., Posset M. Intermodal transport – basics, structure, and planning approaches. *Sustainable Transportation and Smart Logistics: Decision-making Models and Solutions*. Amsterdam: Elsevier. 2018: 123–149. DOI: 10.1016/B978-0-12-814242-4.00005-3.

19. Janic M. An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008; 42(10): 1326–1339. DOI: 10.1016/j.trra.2008.06.008.

20. Monios J., Bergqvist R. *Intermodal Freight Transport & Logistics*. Boca Raton, FL: CRC Press. 2017: 274. ISBN: 978-1-4987-8512-9.

21. Tadić S., Krstić M., Brnjac N. Selection of efficient types of inland intermodal terminals. *Journal of Transport Geography*. 2019; 78: 170–180. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.06.004.

22. Kornilov S.N., Deev E.A., Lukyanov J.I. Optimization method of the multimodal transportation on the base of Dijkstra's algorithm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 272(3): 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032017.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия в теоретические разделы статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Each author has equal share in theoretical sections of the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цыганов Александр Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Логистика и управление транспортными системами», ORCID 0000-0002-8857-6287, Researcher ID: AAH-9785-2019, Scopus Author ID: 57209470019, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: tsyganov.sm@mail.ru).

Осинцев Никита Анатольевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Логистика и управление транспортными системами», ORCID 0000-0003-1168-6725, Researcher ID: K-6237-2013, Scopus Author ID: 56386223400, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: osintcev@magtu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Tsyganov – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, ORCID 0000-0002-8857-6287, Researcher ID: AAH-9785-2019, Scopus Author ID: 57209470019, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia, (455000, Magnitogorsk, Lenin Street, 38, e-mail: tsyganov.sm@mail.ru).

Nikita A. Osintsev – Cand. of Tech. Sci. Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, ORCID 0000-0003-1168-6725, Researcher ID: K-6237-2013, Scopus Author ID: 56386223400, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia, (455000, Magnitogorsk, Lenin Street, 38, e-mail: osintcev@magtu.ru).

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК 691.33

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

ОЦЕНКА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.С. Федюк, А.В. Баранов, Р.А. ТимохинДальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка эффективных конструкционных материалов с улучшенными акустическими характеристиками актуальна для современной строительной индустрии. Учитывая многообразие международных строительных норм по звукоизоляции и звукозащите зданий, необходима систематизация современных методов изучения этих характеристик. Целью исследования был всесторонний обзор методов определения акустических характеристик в строительстве, а также анализ литературы и международных норм для повышения здоровья и комфорта городского населения.

Материалы и методы. В связи с многообразием и сложностью исследования акустических характеристик зданий, помещений и отдельных ограждающих конструкций в статье приведен анализ методов оценки данных характеристик. Выявлены ограничения на размеры помещений и звуковых частот для измерения времени реверберации. Показан процесс усовершенствования метода измерения акустического импеданса в трубе Кундта. Детально рассмотрена методология определения числовых параметров звукоизоляции в зданиях в результате исследования ограждающих конструкций с учетом спектров различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Выявлено, что существующие методы измерения ударного шума показывают плохую воспроизводимость в низкочастотном диапазоне. Анализ работ доказал, что характеристики отражения звука теоретически зависят от толщины и жесткости отражающей поверхности и ее поверхностной плотности.

Заключение. Область применения строительных материалов с улучшенными акустическими характеристиками достаточно обширна. Дальнейшие исследования могут быть направлены на усовершенствование методов исследования характеристик звукопоглощения и звукоотражения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительные материалы, конструкции, звукопоглощение, бетон, звукоизоляция, шум, звук, измерение.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем благодарность д-ру техн. наук, проф. В.С. Лесовику за научное консультирование, а также благодарны за уделенное внимание анонимным рецензентам этой статьи.

Поступила 09.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Федюк Р.С., Баранов А.В., Тимохин Р.А. Оценка звукопоглощающих характеристик и параметров звукоизоляции строительных изделий. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (2): 274-285. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

© Федюк Р.С.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

CRITICAL REVIEW OF METHODS FOR EVALUATING ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PREMISES

Roman S. Fediuk, Andrey V. Baranov, Roman A. Timokhin
the Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russia

ABSTRACT

Introduction: *The development of effective structural materials with improved acoustic characteristics is relevant for the modern construction industry. Considering the variety of international building standards for acoustic insulation and soundproofing of buildings, it is essential to systematize the modern methods of studying these characteristics. The purpose of the study was a comprehensive review of methods for determining acoustic characteristics in construction, as well as an analysis of literature and international standards to improve the health and comfort of the urban population.*

Main part: *Due to the variety and complication of the study of the acoustic characteristics of buildings, premises and individual walling, the article provides an analysis of methods for evaluating these characteristics. The limitations on the size of rooms and sound frequencies for measuring reverberation time have been identified. The process of improving the method of measuring acoustic impedance in Kundt's tube is shown. The methodology for determining the numerical parameters of sound insulation in buildings using the study of building envelopes taking into account the spectra of various noise sources located inside and outside the building is considered in detail. It was found that existing methods for measuring impact noise show poor reproducibility in the low frequency range. The analysis of the works proved that the sound reflection characteristics theoretically depend on the thickness and rigidity of the reflecting surface and its surface density.*

Conclusions: *The scope of building materials with improved acoustic characteristics is quite extensive. Further research may be aimed at improving methods for studying the characteristics of sound absorption and sound reflection.*

KEYWORDS: *building materials, structures, sound absorption, concrete, sound insulation, noise, sound, measurement.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *We express our gratitude to Dr. of Tech. Sci., Professor V.S. Lesovik for scientific advising, and are grateful for the anonymous reviewers' attention paid to this article.*

Submitted 09.04.2020, revised 24.04.2020.

The 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: Fediuk R.S. Baranov A.V., Timokhin R.A. Critical review of methods for evaluating acoustic characteristics of premises. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 274-285. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-274-285>

© Fediuk R.S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Стремительная урбанизация, насыщение городов различными транспортными средствами и объектами промышленности повлекло за собой рост уровня шума [1]. Соответственно, акустический комфорт признан врачами важным компонентом городского комфорта и стал представлять собой актуальную задачу как для жилищного строительства, так и для генерального планирования городов. Поэтому защита от окружающего шума является предметом научных исследований ученых различных специальностей, ведь в современном обществе качество и уровень жизни приобретают из года в год все более важное значение [2].

Однако помимо слышимого звука большое влияние на человека оказывают инфразвук и ультразвук. В частности, инфразвук возникает от действия ветряных электростанций, вибрации железнодорожных мостов, градирен, а также может ощущаться внутри автомобилей [3, 4, 5]. Ультразвуковое и инфразвуковое акустическое нелетальное оружие в последнее время все чаще и чаще ставится на вооружение в правоохранительные органы различных государств.

Необходимо отделение человека от источников шума с помощью строительных ограждающих конструкций. Оценка акустических характеристик этих конструкций представляет собой достаточно сложную задачу. Нужен учет как отражения звуковых волн, так и их поглощения, тем более что в зависимости от частоты этих волн данные характеристики значительно меняются. Разработан ряд методов для исследования акустических характеристик в строительстве, которые достаточно сложны для понимания; эти методы нуждаются в систематизации.

Исходя из вышеизложенного звукоизоляция конструкций и их акустические характеристики стали особо значимы в последние десятилетия вследствие тенденции размещения городского населения в многоквартирных домах. Использование жильцами телевизоров, музыкальных центров, домашних кинотеатров, а также ручного строительного электроинструмента повышает требования к строительству с учетом акустических характеристик ограждающих конструкций. Кроме того, строительная промышленность по всему миру стала применять различные звукопоглощающие материалы, которые способны снизить уровень звукового давления как в открытых, так и в закрытых помещениях, а также увели-

чить звукоизолирующие характеристики. Известно [6], что звукопоглощающие характеристики материала по большей части являются функцией его плотности: более легкие лучше поглощают звук. Цель статьи: всесторонний обзор методов определения акустических характеристик строительных изделий.

ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

Есть несколько причин для измерения времени реверберации. Во-первых, уровень звукового давления источников шума, разборчивость речи и условия конфиденциальности в комнате сильно зависят от времени реверберации. В качестве исследуемых помещений принимаются жилые комнаты, лестницы и пролеты, производственные цеха, классные комнаты, офисы, рестораны, выставочные центры, спортивные залы, вокзалы и аэропорты. Во-вторых, время реверберации измеряется для того, чтобы определить в помещении поправки на звукопоглощение, необходимые для различных типов других акустических измерений, таких как измерение звукоизоляции в соответствии с ISO 140 и звуковой мощности источников шума в соответствии с ISO 3740 [7]. Реверберационная камера используется для измерения звукопоглощающих характеристик ограждающих конструкций (рисунок 1). Среднее время реверберации определяется в реверберационной камере с исследуемым образцом и без него. По результатам измерений времени реверберации эквивалентная площадь звукопоглощения образца A_T рассчитывается по формуле Сэбина [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Если образец равномерно распределен по поверхности камеры (например плоский звукопоглотитель или несколько объектов), коэффициент звукопоглощения определяется как отношение эквивалентной площади звукопоглощения образца A_T к его площади S . Согласно ASTM C 423-17 [13] и ISO 354: 2003 [14] и ГОСТ 31704–2011, измерения проводятся для третьоктавных полос со следующими средними геометрическими частотами, Гц: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000. Объем камеры реверберации составляет 150–500 м³. Для обеспечения удовлетворительной степени диффузии звукового поля независимо от формы камеры используются стационарные или подвесные диффузоры, или вращающиеся лопасти. Площадь образца для испытаний должна составлять от 10 до 12 м².



Рисунок 1 – Измерительная система реверберационной комнаты [17]

Figure 1 – System of testing measurement in reverberation room [17]

Однако, например, в статье [15] площадь образца была уменьшена до $1,87 \text{ м}^2$, в то время как результаты могут быть адекватными, учитывая, что помещение обеспечивает довольно рассеянное звуковое поле. Время реверберации T , с, необходимое для того, чтобы средняя пространственная плотность звуковой энергии падала в ограниченном объеме на 60 дБ от исходного уровня после выключения источника излучения, измеряется в соответствии с ISO 3382-2: 2008 [16] и ISO 354: 2003 [17].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ИМПЕДАНСА В ИМПЕДАНСНОЙ ТРУБЕ

Метод испытания в соответствии с ISO 10534-2: 1998 [18] и ASTM C 384-04 [19] включает использование импедансной трубы (трубы Кундта), двух разно расположенных микрофонов и цифровой системы частотного анализа для определения звукопоглощения строительных материалов (рисунок 2). Он также может быть использован для определения акустического сопротивления поверхности. Акустический импеданс – это сложное звуковое сопротивление среды, которое представляет собой отношение комплексных амплитуд звукового давления к вибрационной объемной скорости (комплексной скорости звуковых частиц) на определенной частоте в плоскости отсчета. Поскольку значения импеданса звукопоглощающего материала связаны с его физическими свойствами, такими как со-

противление воздушного потока, пористость, упругость и плотность, измерения, описанные в этом методе испытаний, полезны для фундаментальных исследований и разработок звукопоглощающих материалов. Метод был впервые применен Ивасе [20] с использованием трех микрофонов (два перед образцом и третий – за ним). Края образцов они закрывали тефлоновой лентой, смазанной тонким слоем вазелина. Фенг [21] модифицировал данный метод, эта модификация и легла в основу стандарта ISO 10534 [19]. В стандартной конфигурации импедансная труба опирается на жесткую пластину, что исключает вибрации, а в модифицированной трубке с концом, вставленным в безэховое помещение, звуковая энергия передается только через образец и характеризуется коэффициентом передачи. Таким образом, с помощью процедуры Фенга можно разделить реальный коэффициент поглощения и коэффициент передачи. Диапазон частот для определения коэффициента звукопоглощения при использовании импедансной трубы составляет 250–5000 Гц, он ограничен в высокочастотной части из-за фиксированного диаметра импедансной трубы и неопределенностью, связанной с получением небольших разностей фаз на низких частотах. В ходе анализа литературы выявлена неприменимость полученных коэффициентов звукопоглощения из-за ошибки, вызванной фазой и величиной частотной характеристики, увеличивающейся, когда частота стремится к нулю.

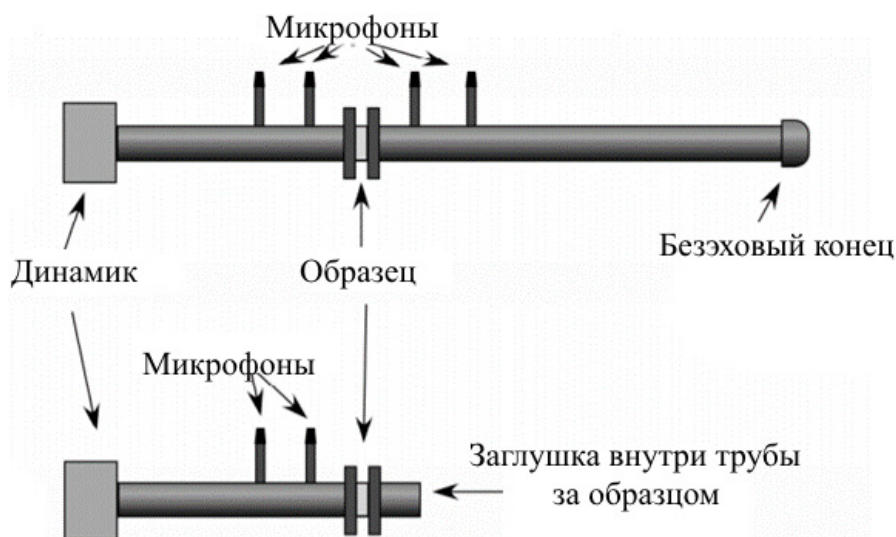


Рисунок 2 – Импедансная труба [22]

Figure 2 – Impedance tube [22]

ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ

Метод ISO 717-1 [23] определяет числовые параметры звукоизоляции в зданиях с помощью исследования строительных конструкций, таких как стены, полы, двери и окна, а также учитывает спектры различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Коэффициент звукоизоляции от воздушного шума R_w считается фундаментальным параметром для лабораторных испытаний ограждающих конструкций. Этот коэффициент учитывает диапазон частот в третьоктавных полосах, от 100 Гц до 3150 Гц, что может быть недостаточно для удовлетворительного описания поведения на низких и высоких частотах. Чтобы рассмотреть акустические характеристики, расширенные по частотам относительно нормализованных шумовых спектров, были введены термины адаптация спектра S и S_{tr} (розовый шум и дорожный шум соответственно). В проекте стандарта ISO / DIS 16717-1 [24] использовались три коэффициента: R_{living} , R_{speech} и $R_{traffic}$, заменяющие «старую» концепцию коэффициента звукоизоляции от воздушного шума. Гризотто и Ди Белла [25], а также и Машович [24] сообщают, что это позволяет измерить в лаборатории скорость снижения звука ниже 100 Гц с использованием современных стандартов измерения. В частности, измерение звукоизоляции от воздушного шума на частотах 50–100 Гц представляет несколько

ко проблем [25]. На низкой частоте проблемы возникают из-за собственных мод, в том числе в довольно больших лабораторных помещениях. Во многих случаях диффузное звуковое поле не может быть обеспечено на низких частотах, и методы измерения стандартов ISO 10140 [23] могут использоваться только для «дополнительной информации». Стандарт ISO 10140 дает завышенную оценку R на частотах ниже 100 Гц по сравнению со значениями, полученными из измерений интенсивности звука. Однако использование метода интенсивности возможно, но это не просто. ISO / DIS 16717-1 [24] рассматривают диапазон только 50–5000 Гц для одночисловых значений. Возможным решением всех этих проблем было бы рассмотрение новых показателей от 100 Гц до 5000 Гц с возможностью расширения до 50 Гц. Стандартные процедуры для натурных измерений звукоизоляции между комнатами в настоящее время описаны в международных стандартах ISO 140. Однако они предназначены для использования в помещениях со звуковыми полями, приближающимися к диффузным полям (таблица).

На практике во многих квартирах имеются комнаты объемом менее 25 м³, где отсутствие рассеянного звукового поля на низких частотах в сочетании с выбором звукового давления в центральной зоне комнаты делает измерения менее надежными и менее актуальными для жителей здания.

Таблица
Краткая характеристика типичных шумов, слышимых в жилых помещениях

Table
A brief description of typical noises heard in premises

Вид шума	Ссылка на источник литературы
Модификатор	Концентрация, в % от массы серы
Шум в жилых зонах	[26,27]
Шум соседей	[22,26,28]
Воздушный шум от соседей (телевидение, музыка и разговоры)	[22,32,34,28]
Шум от падающих / движущихся предметов соседей	[22,32,33,26]
Уличный и транспортный шум	[26,29]
Работа электроприборов соседей	[26,30]
Ходьба соседей	[22,32,33,34,26,35]
Вибрация сотовых телефонов соседей	[26,31]

Учитывая, что звукоизоляция в низкочастотном диапазоне (особенно ниже 100 Гц) важна во всех зданиях, особенно в каркасных деревянных зданиях, исследования Хопкинса и Тернера [36] дали толчок для выявления новых процедурных изменений для повышения надежности и актуальности измерения звукоизоляции в полевых условиях. Эти процедурные изменения были впоследствии использованы в предложении о пересмотре четырех Международных стандартов звукоизоляции (ISO 140, части 4, 5, 7 и 14) на пленарной сессии ISO TC43 SC2 [37] в Корее (ноябрь 2009 г.). Предложение было принято, и Карл Хопкинс стал организатором рабочей команды для написания новых стандартов. Первый международный стандарт ISO / DIS 16283-1 [38] был написан для натурных измерений воздушной звукоизоляции и был распространен среди всех стран в качестве проекта для сбора комментариев весной 2012 г. В результате ISO 140-4: 1998 [39] был заменен ISO 16283-1: 2014 [38], который вводит новые подходы к направленности источника, предел в 8 дБ между соседними 1/3 октавными полосами в комнате источника, средство для расчета «разностей уровней» и низкочастотная процедура измерения уровня звукового давления, не включенная в ISO 140-4. Для процедуры по умолчанию в ISO 16283-1 вводится возможность использовать метод «ручного сканирования микрофоном», также не включенный в ISO 140-4 [6]. ISO 16283-3 устанавливает методы определения звукоизоляции в воздухе с помощью элементов фасада и всего фасада с использованием измерений уровня звукового давления. Эти методы предназначены для объема помещений в диапазоне от 10 м³ до 250 м³ в

диапазоне частот со среднегеометрическими частотами третьоктавной полосы от 50 Гц до 5000 Гц. Сравнение результатов измерений с точки зрения уровня ударного шума и звукоизоляции в соответствии с ISO 140 и ISO 15186 [40] показывает их несоответствие, особенно на низких частотах. Это можно объяснить тем фактом, что на низких частотах, где могут возникать комнатные резонансы, точное определение времени реверберации затруднено.

УДАРНЫЙ ШУМ

При нормировании ударного шума согласно DIN 52210 и ASTM E1007-19 [41] исследуются только частоты от 100 до 3150 Гц. На тестируемом перекрытии устанавливается прибор «tapping machine», оснащенный пятью одинаковыми ударниками весом по 500 г каждый (рисунок 3). С помощью вала эти ударники поднимаются и в определенном ритме свободно падают один за другим на перекрытие. В тестируемой комнате под перекрытием измеряют уровень шума. Чжан и Пун в ходе исследования [14] модифицировали ASTM E1007-19 [41], в частности, они использовали металлический шар для создания ударного шума вместо прибора «tapping machine». Цель теста состояла в том, чтобы определить эффекты снижения шума каждой пластины по сравнению с результатами фонового эксперимента. В данном исследовании уровень шума, вызванного воздействием образцов металлическим шариком, определялся в диапазоне частот также от 100 Гц до 3150 Гц. Данные об уровне шума записывались с интервалами 0,2 с, а общая длительность измерения составляла 3 с, чтобы установить максимальный уровень шума.

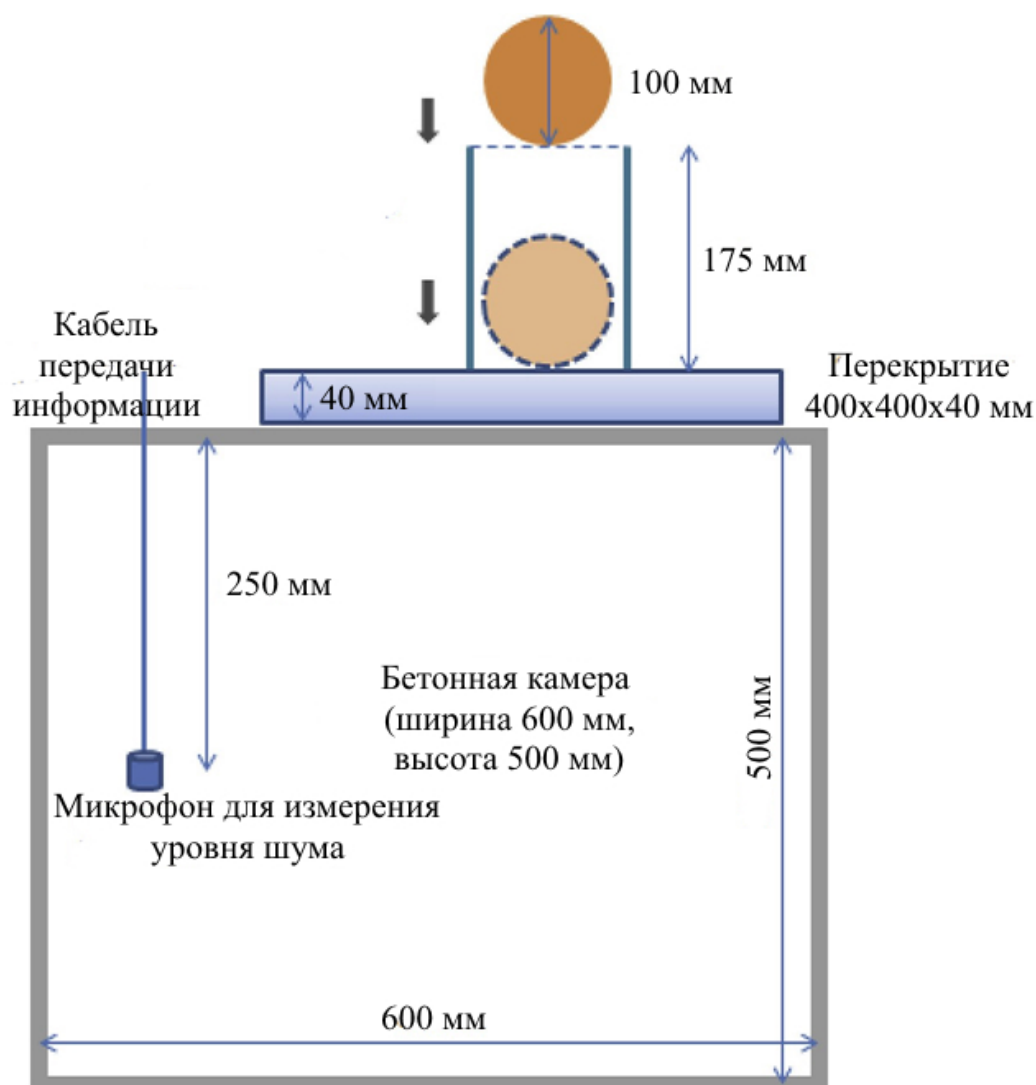


Рисунок 3 – Схема установки для испытания звукоизоляции [42]

Figure 3 – Diagram of sound insulation test setup [42]

Каждый тест повторяли 3 раза, чтобы получить средний уровень шума. Низкочастотная воздушная и ударная изоляция особенно важна в легких зданиях из-за низкого уровня звукоизоляции в низкочастотном диапазоне. Однако существующие методы измерения ударного шума показывают плохую воспроизводимость в низкочастотном диапазоне.

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ (ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА)

Пористый бетон обладает способностью поглощать звук, но имеет низкую звукоизоляцию. Для решения этой проблемы штукатурка или окраска пористого бетона может повлиять на уменьшение звукопоглощения и повыше-

ние его звукоизоляционных свойств [43]. Коэффициент звукопоглощения для тяжелого бетона составляет около 0,02, это означает, что около 98% звуковой энергии отражается. Чем плотнее (тяжелее) бетон, тем выше его звукоизолирующие характеристики [44]. Диапазон отражаемых частот, а также степень сопротивления звукоизоляции в основном зависят от реальной жесткости бетонной массы. Что касается концепции отражения звука от твердой стены, было сформулировано, что частота отражения звука теоретически зависит от толщины и жесткости стены и ее поверхностной плотности [45]. Плотный бетон имеет в 10 раз худшее звукопоглощение по сравнению с ячеистым бетоном [46, 47].

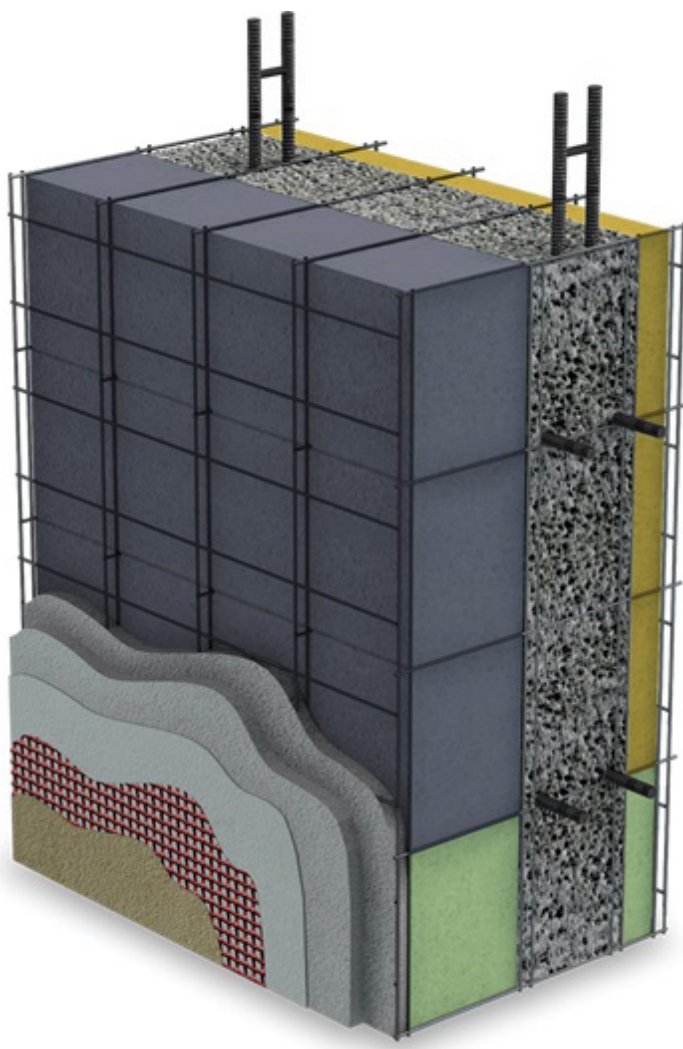


Рисунок 4 – Модель стены из железобетона с чрезвычайно высокой звукоизоляцией

Figure 4 – Model for the construction of RC walls with extremely high acoustic insulation

На акустические характеристики ячеистого бетона может повлиять наличие пузырьков газа, их размер, распределение и протяженность пор и их консистенция [15,48, 49]. На рисунке 4 показана модель стены из железобетона с чрезвычайно высокой звукоизоляцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защита от окружающего шума является предметом научных исследований ученых различных специальностей, ведь в современном обществе качество и уровень жизни приобретают из года в год все более важное значение. В связи с многообразием и сложностью исследования акустических характеристик зданий, помещений и отдельных огражда-

ющих конструкций в статье приведен анализ методов оценки данных характеристик. Выявлены ограничения на размеры помещений и звуковых частот для измерения времени реверберации. Однако на низких частотах (ниже 100 Гц) точные результаты измерений не могут быть получены из-за низкочастотных колебаний реверберационной камеры. Показан процесс усовершенствования метода измерения акустического импеданса в трубе Кундта. Диапазон частот для определения коэффициента звукопоглощения при использовании импедансной трубы составляет 250–5000 Гц, он ограничен в высокочастотной части из-за фиксированного диаметра импедансной трубы и неопределенностью, связанной с получением

небольших разностей фаз на низких частотах. Детально рассмотрена методология определения числовых параметров звукоизоляции в зданиях с помощью исследования ограждающих конструкций с учетом спектров различных источников шума, расположенных внутри и снаружи здания. Однако и при исследовании звукоизоляции на низких частотах появляются проблемы из-за возникновения собственных мод, в том числе в довольно больших лабораторных помещениях. Изучены существующие методы измерения ударного шума при помощи прибора «tapping machine» или же падающего металлического шара. Анализ работ доказал, что характеристики отражения звука теоретически зависят от толщины и жесткости отражающей поверхности и ее поверхностной плотности.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на устранение недостатков современных нормативов, которые часто не соответствуют друг другу. Что касается отечественных норм исследования акустических характеристик, то они являются зачастую переводными версиями зарубежных нормативов. Очевидно требуется углубление исследований применимости методов измерений акустических характеристик зданий и их конструкций, особенно для низких и инфразвуковых частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Cuthbertson D., Berardi U., Briens C., Berruti F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. *Biomass and Bioenergy*. 2019. doi:10.1016/j.biombioe.2018.11.007.
- Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов: монография. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Омск, 2011. 420 с.
- Vinokur R. Infrasound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, *Appl. Acoust.* (2004). doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8.
- Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. *J. Sound Vib.* 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030.
- Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, *J. Sound Vib.* 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5.
- Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Build. Environ.* (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061.
- Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: *Int. Congr. Noise Control Eng.* 2005. INTERNOISE 2005.
- Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Сумской Д.А. Теплоизоляционные растворы пониженной плотности // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Том 1. №1. С. 40 – 50.
- Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, *Appl. Acoust.* 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
- Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, *Constr. Build. Mater.* 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161.
- Maa D.Y. Microperforated-panel wideband absorbers, *Noise Control Eng. J.* 1987. doi:10.3397/1.2827694.
- Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, *Build. Environ.* 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005.
- ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, *ASTM Int.* 2007. doi:10.1520/C0423-17.2.
- Елистраткин М.Ю., Кожухова М.И. Анализ факторов повышения прочности неавтоклавнога газобетона // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Том 1. №1. С. 59 – 68.
- Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 125. 2016. 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019.
- Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: *Acoust. Sci. Technol.*, 2005. doi:10.1250/ast.26.170.
- Milford I., Hønsøien C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Towar. a Quieter Futur.*, 2016.
- International Organization for Standardization, ISO 10534-2, *Work.* 2001.
- American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, *ASTM Philadelphia.* (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2.
- Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. *J. Acoust. Soc. Japan.* 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411.
- Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, *Appl. Acoust.* 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013.
- Mastali M., Kinnunen P., Isoaho H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates, *Constr. Build. Mater.* 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228.

23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, Standards. 2013.
24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, J. Acoust. Soc. Am. 2013. doi:10.1121/1.4824629.
25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: Proc. Forum Acust. 2014.
26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng., 2015.
27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, Appl. Acoust. 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011.
28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: Internoise 2001, 2001.
29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: Energy Procedia. 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246.
30. Højsøien C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future, 2016.
31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, Compos. Struct. 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079.
32. Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Бурлаков Н.М., Брагина Л.Л. Исследование влияния плазмохимического модифицирования на макро- и микроструктуру поверхностного слоя автоклавных стеновых материалов // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №2. С. 4 – 10.
33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, Build. Acoust. 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105.
34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound, Appl. Acoust. 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003.
35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, J. Sound Vib. 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8.
36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies, Appl. Acoust. 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005.
37. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Гудов Д.В., Шураков И.М., Корбут Е.Е. Оптимизация рецептурно-технологических параметров изготовления ячеистобетонной смеси // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №2. С. 30 – 36.
38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smiderle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a Brazilian public school building, in: INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. 2015.
39. International Organization for Standardization, ISO 14044, 2006.
40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: Proc. - Eur. Conf. Noise Control. 2008. doi:10.1121/1.2933313.
41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: 14th Int. Congr. Sound Vib. 2007, ICSV 2007, 2007.
42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, J. Clean. Prod. 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044.
43. Елистраткин М.Ю., Минакова А.В., Джамил А.Н., Куковицкий В.В., Эльян Исса Жамал Исса. Композиционные вяжущие для отделочных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №2. С. 37 – 44.
44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, Constr. Build. Mater. 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.
45. Tada S. Material design of aerated concrete - An optimum performance design, Mater. Struct. 1986. doi:10.1007/BF02472306.
46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, ACI J. Proc. 1954. doi:10.14359/11795.
47. Jones M.R., McCarthy M.J., McCarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward: A UK perspective, Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky. 2003.
48. Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, 2009. doi:10.1002/9780470747339.
49. Arnaud L., Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, Constr. Build. Mater. 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

REFERENCES

1. Cuthbertson D., Berardi U., Briens C., Berruti F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. Biomass and Bioenergy. 2019. doi:10.1016/j.biombioe.2018.11.007.
2. Lesovik V.S., Chulkova I.L. *Upravlenie strukturoobrazovaniem stroitel'nykh kompozitov: monografiya* [Structural management of building composites: monograph]. Sibirskaya gosudarstvennaya avto-mobil'no-dorozhnaya akademija. Omsk, 2011: 420. (in Russian)
3. Vinokur R. Infrasonic sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, Appl. Acoust. (2004). doi:10.1016/S0003-682X(03)00117-8.
4. Li X., Liu Q., Pei S., Song L., Zhang X. Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation. J. Sound Vib. 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.05.030.
5. Tsunekawa S., Kajikawa Y., Nohara S., Ariizumi M., Okada A. Study on the perceptible level for infrasound, J. Sound Vib. 1987. doi:10.1016/S0022-460X(87)80089-5.

6. Keränen J., Hakala J., Hongisto V. The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz, *Build. Environ.* (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.061.
7. Lang W.W., Higginson R.F. The evolution of the ISO 3740 series of international standards, in: *Int. Congr. Noise Control Eng.* 2005. INTERNOISE 2005.
8. Zagorodniuk L.Kh., Lesovik V.S., Sumskoy D.A. Thermal insulation solutions of low density // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 1. S. 40 - 50.
9. Kim H.K., Lee H.K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete, *Appl. Acoust.* 2010. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
10. Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus, *Constr. Build. Mater.* 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.161.
11. Maa D.Y. Microperforated-panel wide-band absorbers, *Noise Control Eng. J.* 1987. doi:10.3397/1.2827694.
12. Park H.S., Oh B.K., Kim Y., Cho T. Low-frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer, *Build. Environ.* 2015. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.005.
13. ASTM C423, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method 1, *ASTM Int.* 2007. doi:10.1520/C0423-17.2.
14. Elistratkin M.Yu., Kozhukhova M.I. Analysis of factors to increase the strength of non-autoclaved aerated concrete // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 1. S. 59 - 68.
15. Zhuang X.Y., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 125. 2016. 253–267. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019.
16. Bradley J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls, in: *Acoust. Sci. Technol.*, 2005. doi:10.1250/ast.26.170.
17. Milford I., Højsøen C.O., Løvstad A., Rindel J.H., Klæboe R. Socio-acoustic survey of sound quality in dwellings in Norway, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 - 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future*, 2016.
18. International Organization for Standardization, *ISO 10534-2*, Work. 2001.
19. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method*, ASTM Philadelphia. (1999). doi:10.1520/C0384-04R11.2.
20. Iwase T., Izumi Y. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material. *J. Acoust. Soc. Japan.* 1996. doi:10.20697/jasj.52.6_411.
21. Feng L. Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials, *Appl. Acoust.* 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.06.013.
22. Mastali M., Kinnunen P., Isomäoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates, *Constr. Build. Mater.* 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.228.
23. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, *Standards*. 2013.
24. Mašović D.B., Pavlović D.S.Š., Mijić M.M. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. doi:10.1121/1.4824629.
25. Di Bella A., Granzotto N., Pavarin C. Comparative analysis of thermal and acoustic performance of building elements, in: *Proc. Forum Acust.* 2014.
26. Guigou-Carter C., Balanant N. Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings, in: *INTER-NOISE 2015 - 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng.*, 2015.
27. Yang W., Kang J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces, *Appl. Acoust.* 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2004.07.011.
28. Bradley J.S. Deriving acceptable values for party wall sound insulation from survey results, in: *Inter-noise 2001*, 2001.
29. Mihai T., Iordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in: *Energy Procedia*. 2016. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.246.
30. Højsøen C.O., Rindel J.H., Løvstad A., Klæboe R. Impact sound insulation and perceived sound quality, in: *Proc. INTER-NOISE 2016 – 45th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Toward a Quieter Future*, 2016.
31. Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, *Compos. Struct.* 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.079.
32. Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Burlakov N.M., Bragina L.L. Investigation of the effect of plasma-chemical modification on the macro- and micro-structure of the surface layer of autoclaved wall materials // *Building materials and products*. 2018. Volume 1. No. 2. S. 4 - 10.
33. Hagberg K.G. Evaluating field measurements of impact sound, *Build. Acoust.* 2010. doi:10.1260/1351-010X.17.2.105.
34. Ljunggren F., Simmons C., Hagberg K. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, *Appl. Acoust.* 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.04.003.
35. Bodlund K. Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings, *J. Sound Vib.* 1985. doi:10.1016/S0022-460X(85)80149-8.
36. Hopkins C., Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-dif-

fuse sound fields at low frequencies, Appl. Acoust. 2005. doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.005.

37. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of the prescription and technological parameters of manufacturing aerated concrete mix // Building materials and products. 2018. Volume 1. No. 2. S. 30 - 36.

38. Da Rocha R.E., Maiorino A.V., Dias L.L., Smiderle R., Bertoli S.R. Field investigations of the sound insulation performance in a brazilian public school building, in: INTER-NOISE 2015 – 44th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. 2015.

39. International Organization for Standardization, ISO 14044, 2006.

40. Cassidy M., Cooper R.K., Gault R., Wang J. Evaluation of standards for transmission loss tests, in: Proc. - Eur. Conf. Noise Control. 2008. doi:10.1121/1.2933313.

41. LoVerde J.J., Dong W. Investigation of a two-parameter system of evaluating impact noise insulation, in: 14th Int. Congr. Sound Vib. 2007, ICSV 2007, 2007.

42. Zhang B., Poon C.S. Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete, J. Clean. Prod. 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.044.

43. Elistratkin M.Yu., Minakova A.V., Jamil A.N., Kukovitsky V.V., Eljan Issa Zhamal Issa. Composite binders for finishing compounds // Building materials and products. 2018. Volume 1. No. 2. S. 37 - 44.

44. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, Constr. Build. Mater. 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.

45. Tada S. Material design of aerated concrete-An optimum performance design, Mater. Struct. 1986. doi:10.1007/BF02472306.

46. Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, ACI J. Proc. 1954. doi:10.14359/11795.

47. Jones M.R., McCarthy M.J., McCarthy A. Moving fly ash utilisation in concrete forward : A UK perspective, Int. Ash Util. Symp. Cent. Appl. Energy Res. Univ. Kentucky. 2003.

48. Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, 2009. doi:10.1002/9780470747339.

49. Arnaud L., Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, Constr. Build. Mater. 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все соавторы внесли равный вклад.

AUTHORS' CONTRIBUTION

The authors have equal contribution to the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федюк Роман Сергеевич – доц. кафедры гидро-техники, теории зданий и сооружений ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Баранов Андрей Вячеславович (Владивосток, Россия) – соискатель ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Тимохин Роман Андреевич (Владивосток, Россия) – студент ФГАОУ ВО «ДВФУ» (690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman S. Fediuk – Associate Professor of the Hydraulic Engineering, Theory of Buildings and Structures Department, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Andrey V. Baranov (Vladivostok, Russian Federation), Aspirant, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

Roman A. Timokhin (Vladivostok, Russian Federation), student, Federal State Autonomous Institution of Higher Education “the Far Eastern Federal University” (690950, 8, Sukhanova St., Vladivostok, Russian Federation, e-mail: fedyuk.rs@dvfu.ru).

УДК 625.74:504.06

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-286-301>

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКИ В Г. ОМСКЕ

Д.А. Шевелёв, В.В. Сиротюк, Е.А. Геращенко, Е.А. Степанова
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Шумовое загрязнение входит в тройку самых значительных экологических нарушений в мире. В городских условиях главным источником шума является автомобильный транспорт, на долю которого приходится до 80% всего шума. Мероприятия по защите от шума являются составной частью проектирования как на этапе ТЭО, так и при разработке проектов. В условиях стеснённой городской застройки, высокой плотности улично-дорожной сети, дефицита свободных территорий наиболее целесообразно применение шумозащитных сооружений в виде придорожных шумозащитных (акустических) экранов – вертикальных стенок, устанавливаемых максимально близко к транспортной магистрали. Однако, как показывает практика, в условиях эксплуатации шумозащитные экраны не всегда в полной мере выполняют свою защитную функцию. В данной статье представлен критический анализ эффективности установки шумозащитных экранов на примере транспортной развязки по ул. 15-я Рабочая в г. Омске.

Материалы и методы. Оценка эффективности проектных решений по установке шумозащитных экранов и исполнения этих решений производили двумя методами. Первый метод – расчётный. Расчёт шумового воздействия от транспортного потока на жилую застройку проводился по методике ОДМ 218.2.013–2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. Для выполнения расчётов был определён состав и интенсивность движения транспортных средств на каждом участке развязки. Установлены геометрические параметры на объекте. Вторым методом – экспериментальный. Для подтверждения результатов расчёта проведены натурные измерения уровня шума в девяти точках на указанной развязке.

Результаты. По результатам данного расчёта сделан вывод, что существующие шумозащитные сооружения не выполняют свою функцию в полной мере. Жилая застройка на рассматриваемом участке находится в зоне шумового дискомфорта. Результаты натурных измерений подтверждаются расчётными данными. В статье даны рекомендации по исправлению недостатков, допущенных при проектировании и строительстве шумозащитных экранов.

Заключение. С учётом результатов исследований, изложенных в данной статье и опубликованных ранее, целесообразно рассмотреть вопрос о реконструкции транспортной развязки по ул. 15-я Рабочая в г. Омске.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шумовое загрязнение, шумозащитные экраны, транспортный поток, эффективность снижения шума.

Поступила 20.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Шевелёв Д.А., Сиротюк В.В., Геращенко Е.А., Степанова Е.А. Анализ эффективности применения шумозащитных экранов на примере транспортной развязки в г. Омске. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 286-301. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-286-301>

© Шевелёв Д.А., Сиротюк В.В., Геращенко Е.А., Степанова Е.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-286-301>

THE IMPACT ANALYSIS OF THE NOISE SCREENS ON THE EXAMPLE OF A TRANSPORT INTERCHANGE IN THE CITY OF OMSK

**Dmitry A. Shevelev, Viktor V. Sirotiuk,
Elena A. Gerashchenko, Elena A. Stepanova**
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”,
Omsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Noise pollution is one of the three most significant environmental disruptions in the world. In urban areas, the main source of noise is road transport, which accounts up to 80% of all noise. Noise protection measures are an integral part of the design both at the feasibility study stage and during a project development. In the conditions of cramped urban development, high density of the road network and the shortage of free territories, it is more appropriate to use noise protection structures in the form of roadside noise (acoustic) screens - vertical walls that are installed as close as possible to the highway. However, as the experience has shown, in operating conditions, noise screens do not always fully fulfill their protective function. This article presents a critical analysis of the effectiveness of the noise screens installation on the example of a traffic interchange on 15th Rabochaia in Omsk.

Materials and methods. The evaluation of the effectiveness of the design solutions for the installation of noise screens and the execution of these solutions was carried out with two methods. The first method is calculating. The calculation of the noise impact from the traffic flow on the residential development was carried out according to the methodology of ODM 218.2.013-2011 the Guidelines for the protection from traffic noise of territories adjacent to the roads. To perform the calculations, the content and intensity of the movement of transport at each section of the interchange was determined. The geometric parameters on the object are set. The second method is experimental. To confirm the calculation results, the full-scale measurements of the noise level at nine points at the indicated interchange were carried out.

Results. Based on the results of the calculation it was concluded that the current noise protection structures do not fully fulfill their function. A residential development in the area under consideration is located in the noise discomfort zone. The results of field measurements are confirmed by calculated data. The article gives recommendations for correcting the shortcomings made in the design and construction of the noise screens.

Conclusion. Considering the results of the research presented in this article and published earlier, it is advisable to consider the reconstruction of the transport interchange on 15th Rabochaia street in Omsk.

KEYWORDS: noise pollution, noise screens, traffic flow, noise reduction efficiency.

Submitted 20.03.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Shevelev D.A., Sirotyuk V.V., Gerashchenko E.A., Stepanova E.A. The impact analysis of noise protection screens on the example of a transport interchange in the city of Omsk. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 286-301. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-286-301>

© Shevelev D.A., Sirotiuk V.V., Gerashchenko E.A., Elena S.A.



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост воздействия негативных факторов на человека в среде его обитания. Развитие транспортной сети и повышение уровня автомобилизации приводит к росту шумового загрязнения этой среды, причем человек как биологический вид не эволюционирует в этом отношении [1]. В старых городах жилая застройка интенсивно проводилась в 50–70-е гг. XX в. Характерные особенности застройки того времени: жилые здания располагались близко к городским автомагистралям (10–20 м), не учитывался рост интенсивности транспортных потоков в перспективе, возводились жилые дома небольшой этажности [2].

Таким образом, проблема снижения шума и улучшения акустической обстановки в квартирах домов, прилегающих к автомагистралям, а также на тротуарных проходах между домами и городскими автомагистралями является актуальной. Интерес к данной проблеме обусловлен постоянным увеличением объема и мощности автопарка городов, расширением сети дорог, негативно влияющих на акустический комфорт¹.

Значительный интерес к проблеме шумового загрязнения городской среды уделяют и за рубежом [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Физическая сущность звука заключается в возбужденном каким-либо источником колебании атмосферы или иной проводящей среды, обладающей упругостью и инерционностью. Ухо реагирует на звуковые волны с частотой от 20 Гц до 20 кГц². Шумовое загрязнение – это превышение естественного уровня шумового фона или ненормальное изменение звуковых характеристик: периодичности, силы звука и пр. Шумовое загрязнение входит в тройку самых значительных экологических нарушений в мире [11]. Шумовое загрязнение приводит к повышенной утомляемости человека и животных, понижению производительности труда, физическим и нервным заболеваниям.

Транспортные потоки являются одним из основных акустических загрязнителей окружающей среды, на долю которых приходится до 80% всего шума. Люди, живущие вблизи улиц с большой интенсивностью движения, ежедневно подвергаются воздействию шума автотранспорта в течение 15–8 ч. Они чаще жалуются на головные боли, бессонницу и общее недомогание [12]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [11], сердечнососудистые заболевания могут возникнуть, если человек по ночам постоянно подвергается воздействию шума громкостью 50 дБА и более. Такой шум издают улицы с интенсивным движением.

Распространение шума на территории жилой застройки – сложный процесс, характеризующийся такими явлениями, как дивергенция, интерференция, дифракция, рефракция, рассеяние, поглощение звука элементами внешней среды и подстилающей поверхности и т.д. В основу гигиенически допустимых уровней шума для населения положены фундаментальные физиологические исследования по определению действующих и пороговых уровней шума³ [13, 14, 15, 16]. В настоящее время шум для условий городской застройки нормируют в соответствии с требованиями СН 2.2.4/2.1.8.562–964. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки: санитарные нормы; СП 276.1325800–20165 Здания и территории. Правила проектирования от шума транспортных потоков, регламентирующих расчетные методы, применяемые для проектирования АЭ с целью снижения шумового воздействия транспортных потоков на примыкающих территориях.

В рассматриваемых нами задачах имеют значение эквивалентные показатели уровня звука для следующих условий: территории, непосредственно прилегающие к жилым домам (2 м от ограждающих конструкций), площадки отдыха микрорайонов и групп жилых домов,

¹ Верзилин В.А. Автомобильный транспорт: организация, безопасность, эффективность. Воронеж: изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2001. 256 с.

² Евгеньев И.Е., Каримов Б.Б. Автомобильные дороги в окружающей среде. М.: ООО «Трансдорнаука», 1997. 285 с.

³ Шумозащита в градостроительстве / Б. Прутков, И. Шишкин, Г. Осипов, И. Карагодина. Москва: Стройиздат, 1966. 115 с.

⁴ СН 2.2.4/2.1.8.562–96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки [Электронный ресурс]: санитарные нормы: утв. 31.10.96: введен в д. 31.10.96. Режим доступа <https://base.garant.ru/4174553/> (дата обращения 30.02.2020).

⁵ СП 276.1325800–2016 Здания и территории. Правила проектирования от шума транспортных потоков [Электронный ресурс]: Режим доступа <https://base.garant.ru/71636066/> (дата обращения 10.04.2020). Текст. электронный.

площадки детских дошкольных учреждений, участки школ (допустимый уровень – 45 дБА).

Для оценки непостоянных шумов используют «уровень звука» – общий уровень звукового давления, измеряемый на частотной коррекции «А», характеризующей частотную характеристику восприятия шума человеческим ухом. Единица измерения дБА имеет логарифмический масштаб. Это означает, что увеличение уровня шума на 10 дБ соответствует ощущению роста этого показателя в два раза.

В условиях стесненной городской застройки, высокой плотности улично-дорожной сети, дефицита свободных территорий наиболее целесообразно применение шумозащитных сооружений в виде придорожных шумозащитных (акустических) экранов – вертикальных стенок, устанавливаемых максимально близко к транспортной магистрали, но не ближе предельно допустимого расстояния по габаритам приближения. Появление первых в мире акустических экранов (далее – АЭ) следует отнести к концу XIX в., когда в Лондоне вдоль железной дороги были установлены первые экраны из бетона. Во второй половине XX в., более 60 лет назад, в США, странах ЕС, Японии начались массовые применения АЭ. Например, в Японии к концу XX в. на железных и автомобильных дорогах было установлено более 5 тыс. км АЭ [3].

Опыт применения АЭ в нашей стране невелик по сравнению с другими развитыми странами. В РФ первые АЭ возникли немногим более 25 лет назад на МКАД [13], а первый нормативный документ, позволяющий проектировать АЭ, появился в нашей стране в конце 70 гг. XX в. (СНиП II-12-77).

Шумозащитные экраны выполняют множество функций помимо прямого предназначения – защиты от шума. Установленные вдоль дорог, они выполняют функцию барьера. С

одной стороны, экраны перегораживают выход на проезжую часть людям и животным, что способствует предотвращению дорожно-транспортных аварийных ситуаций, а с другой – защищают придорожную территорию от загрязняющих компонентов, источником которых является проезжая часть дороги [5, 6, 17].

На сегодняшний день технология изготовления и применения экранов, защищающих от шума, достаточно интенсивно развивается, внедряются различные инновации и более эффективные решения. Однако основная классификация остаётся – конструкции этого типа условно делятся на три категории по принципу работы: звукопоглощающие; звукоотражающие и комбинированные защитные экраны.

В названии шумозащитных экранов отражаются основные принципы их работы. Наибольшей популярностью для изготовления звукопоглощающих экранов пользуются сэндвич-панели, в которых звуковые волны поглощаются за счёт плотного материала (минеральной ваты или пенополистирола), помещённого между металлическими или пластиковыми листами. Звукоотражающие экраны чаще изготавливают из пустотелого поликарбоната.

Акустический экран и его элементы должны обеспечивать требуемое снижение шума, обладать достаточной механической прочностью, стойкостью к деформации и устойчивостью при воздействии расчётных (весовой, ветровой и снеговой) нагрузок. АЭ также должен обладать коррозионной стойкостью, долговечностью, вандалозащищённостью, огнестойкостью, ремонтпригодностью и удобством в обслуживании.

Проектирование АЭ ведут с учётом нормативных документов: ГОСТ Р 52748⁶, СП 22.13330⁷, СП 24.13330⁸, СП 35.13330⁹, СП 45.13330¹⁰, СП 131.13330¹¹, СП 52–101¹².

⁶ ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-52748-2007>.

⁷ СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>

⁸ СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 (с Опечаткой, с Изменениями N 1, 2, 3). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084538>

⁹ СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084849>

¹⁰ СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 (с Изменением N 1). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456074910>

¹¹ СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями N 1, 2). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>

¹² СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200037361>



Рисунок 1 – Внешний вид транспортной развязки

Figure 1 – The layout of a transport interchange

Однако не всегда эксплуатационные показатели объектов транспортной инфраструктуры удовлетворяют заявленным требованиям из-за ошибок, допущенных при проектировании и строительстве.

В данной статье представлен критический анализ эффективности установки шумозащитных экранов на транспортной развязке по ул. 15-я Рабочая в г. Омске. Эта транспортная развязка имеет общую протяжённость около двух километров и включает в себя реконструированные участки улиц Демьяна Бедного, Хабаровская и непосредственно 15-я Рабочая. Путепровод проходит через пути Транссибирской магистрали. Эта транспортная развязка (рисунок 1) обеспечивает прямую связь двух промышленных районов (Ленинский и Октябрьский округа), а также микрорайона Черёвовой с крупнейшими магистралями Омска – улицами Кирова и Б. Хмельницкого.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным линейным источником шума на данной развязке является транспортный поток, движущийся по улицам Хабаровская, 15-я Рабочая, Д. Бедного, состоящий из отдельных транспортных средств, обладающих различными динамическими характеристиками и управляемых разными по квалификации водителями, т.е. не являющийся однородным.

Фронт звуковой волны – цилиндрический. Доля грузовых автомобилей и автобусов в составе транспортного потока составляет менее 5%. Геометрические параметры поперечного профиля дороги: ширина проезжей части 10,5 м, поперечный уклон 2,0%.

Рассматриваемая развязка обустроена комбинированными шумозащитными экранами ограниченной длины (рисунок 2).

Оценка эффективности проектных решений по установке шумозащитных экранов и исполнению этих решений производилась двумя методами.

Первый метод – расчётный. Расчёт шумового воздействия от транспортного потока на жилую застройку производился по методике ОДМ 218.2.013– 2011¹³ Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. Для выполнения расчётов был определён состав и интенсивность движения транспортных средств на каждом участке развязки. Установлены геометрические параметры на объекте, требуемые для расчёта.

Застройка на рассматриваемом участке малоэтажная, в большей части представлена одноэтажными частными домами с окнами, выходящими на примагистральную территорию, и земельными участками, огражденными забором.

¹³ ОДМ 218.2.013–2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам [Электронный ресурс]: Режим доступа <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70186554/> (дата обращения 15.03.2020). Текст. электронный.

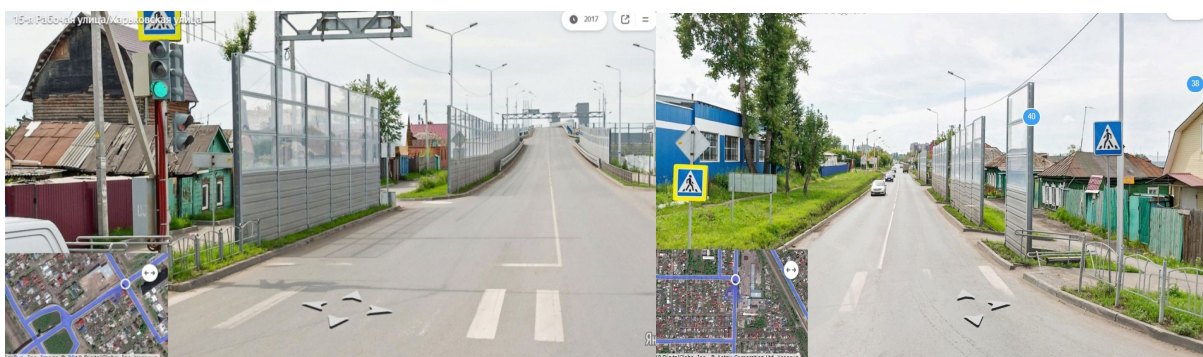


Рисунок 2 – Шумозащитные экраны на улицах транспортной развязки

Figure 2 – Noise screens on the streets of a transport interchange

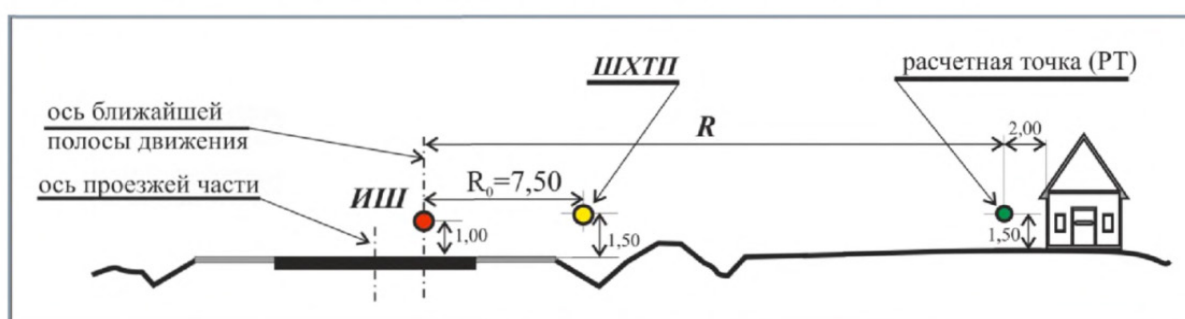


Рисунок Г.4 - Схема расчетных сечений

Рисунок 3 – Схема положения источника шума:

ИШ – источник шума; РТ – расчётная точка;
ШХТП – шумовая характеристика транспортного потока

Figure 3 – Diagram of the position of the noise source:

NS – noise source; CP – calculation point;
NCTF – noise characteristic of the traffic flow

При оценке необходимости снижения транспортного шума рассматривалась первая линия застройки. Расположение расчётных точек определено по ГОСТ 20444–2014 Шум¹⁴. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики. Схема для расчётов представлена на рисунке 3.

Шумовая характеристика транспортного потока определялась на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей полосы движения, на высоте 1,5 м над уровнем поверхности. Расчётное значение ШХТП в виде максимального уровня звука установлено $L_{\text{АмаксТА}} = 80,0$ дБА (в виду наличия грузовых автомобилей и автобусов и скорости движения потока – 50 км/ч).

Расчётное значение ШХТП в виде эквивалентного уровня звука определяли по формуле

$$L_{\text{Аэкв7,5}} = L_{\text{Атрп7,5}} + (\Delta L_{\text{Агруз}} + \Delta L_{\text{Аск}} + \Delta L_{\text{Аук}} + \Delta L_{\text{Апок}} + \Delta L_{\text{Арп}} + \Delta L_{\text{Аперес}}), \quad (1)$$

где $L_{\text{Атрп7,5}}$ – расчётное значение эквивалентного уровня звука транспортного потока, дБА, на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей полосы движения и на высоте 1,5 м над уровнем проезжей части; $\Delta L_{\text{Агруз}}$ – поправка, дБА, учитывающая грузовые автомобили и автобусы в составе транспортного потока; $\Delta L_{\text{Аск}}$ – поправка, дБА, учитывающая среднюю скорость движения; $\Delta L_{\text{Аук}}$ – поправка, дБА, учитывающая величину продольного уклона; $\Delta L_{\text{Апок}}$ – поправка, дБА, учиты-

¹⁴ ГОСТ 20444– 2014 Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики [Электронный ресурс]: Режим доступа <https://base.garant.ru/71102668/> (дата обращения 10.03.2020). Текст. электронный.

вающая тип покрытия проезжей части дороги; $\Delta L_{\text{Арп}}$ – поправка, дБА, учитывающая ширину центральной разделительной полосы; $\Delta L_{\text{Аперес}}$ – поправка, дБА, учитывающая наличие пересечения автомобильной дороги.

При установленном $L_{\text{Амакс7А}}$ определяли значения параметров по формулам (2), (3) и (4).

$$L_{\text{Атрп7,5}} = 50 + 8,8 \times \lg N, \quad (2)$$

где N – расчётная интенсивность движения,

авт/ч, в дневной или ночной периоды времени, определяемая по формулам

$$N_{\text{Д}} = 0,076 \times N_{\text{сут}}, \quad (3)$$

$$N_{\text{Н}} = 0,039 \times N_{\text{сут}}. \quad (4)$$

Полученные значения $L_{\text{Атрп7,5}}$ приведены в таблице 1

Таблица 1
Значения шумовой характеристики транспортного потока (ШХТП)

Table 1
The values of traffic flow noise characteristic (NCTF)

Участок	Расчётная суточная интенсивность движения, авт/сут	Расчётная часовая интенсивность, авт/час		$L_{\text{Атрп7,5}}$, дБА	
		днём (с 7 до 23)	ночью (с 23 до 7)	днём (с 7 до 23)	ночью (с 23 до 7)
ул. Хабаровская	29 165	2217	1138	79,5	77,0
ул. 15-я Рабочая	30 077	2286	1174	79,6	78,0
ул. Д. Бедного	38 794	2949	1513	80,6	78,0

Принятые, согласно исходным данным, значения поправок приведены в таблице 2.

Таблица 2
Значения поправок

Table 2
Correction values

Поправка	Условные обозначения	Значение поправки
Поправка, дБА, учитывающая долю грузовых автомобилей и автобусов	$L_{\text{Агруз}}$	-3,0 дБА
Поправка, учитывающая отличие средней скорости движения транспортного потока от стандартизированного значения, равного 60	$L_{\text{Аск}}$	-1 дБА
Поправка, учитывающая величину продольного уклона проезжей части	$L_{\text{Аук}}$	+2,0 дБА
Поправка, учитывающая тип покрытия проезжей части дороги	$L_{\text{Апок}}$	-2,0 дБА
Поправка, учитывающая ширину центральной разделительной полосы	$L_{\text{Арп}}$	0 дБА
Поправка, учитывающая наличие пересечения	$L_{\text{Аперес}}$	0 дБА
Суммарная поправка		-4 дБА

Значения эквивалентного и максимального уровня шума с учётом поправок представлены в таблице 3.

Таблица 3
Значения шумовой характеристики транспортного потока (ШХТП) с учётом поправок

Table 3
The values of noise characteristic of transport flow (NCTF), considering the corrections

Участок	Период времени	Расчётные значения ШХТП, дБА	
		По максимальному уровню звука	По эквивалентному уровню звука
ул. Хабаровская	дневной	76	75,5
	ночной	76	73,0
ул. 15-я Рабочая	дневной	76	75,6
	ночной	76	74,0
ул. Д. Бедного	дневной	76	76,6
ночной		76	74,0

На распространение шума по территории влияет множество факторов: удаленность расчётной точки от источника шума, поглощение звука в воздухе, направление и скорость ветра, поглощение звука поверхностью покрытия между расчётной точкой и источником шума, наличие полосы зелёных насаждений, существующая застройка, видимость источника шума.

Определение уровня шума в расчётной точке с учетом факторов окружающей среды производили по формуле

$$L_{\text{АэквРТ}} = L_{\text{Аэкв7,5}} - (\Delta L_{\text{Арас}} + \Delta L_{\text{Авоз}} + \Delta L_{\text{В/Т}} + \Delta L_{\text{Апок}} + \Delta L_{\text{Азел}} + \Delta L_{\text{Аэкр}} + \Delta L_{\text{Азаст}} + \Delta L_{\text{Аотр}} + \Delta L_{\text{А\theta}}) \quad (5)$$

где $L_{\text{Аэкв7,5}}$ – ШХТП по эквивалентному уровню звука, дБА; $\Delta L_{\text{Арас}}$ – снижение уровня звукоотрабатного потока, дБА, в зависимости от расстояния до расчётной точки; $\Delta L_{\text{Авоз}}$ – снижение уровня звука, дБА, вследствие его затухания в воздухе; $\Delta L_{\text{В/Т}}$ – поправка, учитывающая влияние турбулентности воздуха и ветра на процесс распространения звука, дБА; $\Delta L_{\text{Апок}}$ – снижение уровня звука, дБА, вследствие его поглощения поверхностью территории; $\Delta L_{\text{Азел}}$ – снижение уровня звука, дБА, полосами зелёных насаждений; $\Delta L_{\text{Аэкр}}$ – снижение уровня звука, дБА, существующими шумозащитными сооружениями на пути звуковых лучей от автомобильной дороги к расчётной точке; $\Delta L_{\text{Азаст}}$ – поправка, дБА, учитывающая влияние придорожной застройки; $\Delta L_{\text{Аотр}}$ – поправка, дБА, учитывающая отражение звука от ограждающих конструкций зданий; $\Delta L_{\text{А\theta}}$ – поправка, дБА, учитывающая снижение уровня звука вследствие ограничения угла видимости улицы (дороги) из расчётной точки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПЕРВОМУ МЕТОДУ

Расчёт снижения шума АЭ осуществляли в соответствии с методикой СП 276.1325800-2016¹⁵. Акустическая эффективность экрана зависит от разности длин путей звукового луча δ , определяемой по формуле

$$\delta = a + b - c, \quad (6)$$

где δ – разность длин путей звукового луча, м; a – кратчайшее расстояние между акустическим центром транспортного потока и верхней кромкой экрана, м; b – кратчайшее расстояние от верхней кромки экрана до расчётной точки, м; c – кратчайшее расстояние от акустического центра транспортного потока до расчётной точки, м.

¹⁵ СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456050585>

Результаты проведённого расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4
Значения уровня шума в расчётных точках

Table 4
Noise level values at design points

№ рас- чётной точки	Период времени	Значение, дБА		Превышение, дБА	
		максимальный уровень шума	эквивалентный уровень шума	максимального уровня шума	эквивалентного уровня шума
ул. Хабаровская					
1	дневной	61,39	60,89	-8,61	5,89
	ночной	61,39	58,39	1,39	13,39
2	дневной	62,23	61,73	-7,77	6,73
	ночной	62,23	59,23	2,23	14,23
3	дневной	61,0	60,5	-8,96	5,54
	ночной	61,0	58,0	1,04	13,04
ул. Д. Бедного					
1	дневной	64,20	64,80	-5,80	9,80
	ночной	64,20	62,20	4,20	17,20
2	дневной	62,60	63,20	-7,40	8,20
	ночной	62,60	60,60	2,60	15,60
3	дневной	66,15	66,75	-3,85	11,75
	ночной	66,15	64,15	6,15	19,15
15-я Рабочая					
1	дневной	62,93	62,53	-7,07	7,53
	ночной	62,93	60,93	2,93	15,93
2	дневной	51,41	51,01	-18,59	-3,99
	ночной	51,41	49,41	-8,59	4,41

По результатам проведённого расчёта можно сделать вывод, что существующие шумозащитные сооружения не выполняют свою функцию в полной мере, жилая застройка на рассматриваемом участке находится в зоне шумового воздействия, превышающего допустимые значения.

Материалы и методы, применяемые при втором методе – экспериментальном.

Для подтверждения результатов расчёта проведены натурные измерения уровня шума в девяти точках на рассматриваемой развязке.

Измерения проводили с использованием интегрирующего шумомера-виброметра ШИ-01В по методике ГОСТ 20444–2014¹⁶. Места для проведения измерений шумовых характеристик автотранспортных потоков выбирали на прямолинейных участках улиц с установив-

шей скоростью движения автотранспортных средств, на расстоянии не менее 50 м от перекрестков и остановочных пунктов пассажирского общественного транспорта.

При проведении измерений шумовых характеристик главная ось измерительного микрофона была направлена в сторону транспортного потока и перпендикулярно к направлению дороги. Оператор, проводивший измерения, находился на расстоянии 0,6 м от измерительного микрофона для предупреждения нежелательных отражений звука. Измерительный микрофон располагался на расстоянии (7,5±0,2) м от оси, ближней к точке измерения полосы движения транспортных средств, и на высоте (1,5±0,1) м от уровня покрытия проезжей части.

¹⁶ ГОСТ 20444–2014 Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики (Переиздание). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200114240>

Таблица 5
Значения уровня шума в расчётных точках

Table 5
Noise level values at calculation points

№ рас- счётных точек	Значение, дБА		Превышение, дБА	
	максимальный уровень шума	эквивалентный уровень шума	максимального уровня шума	эквивалентного уровня шума
1	71,0	75,0	16,0	5,0
2	65,5	67,5	10,5	-2,5
3	60,2	63,2	5,2	-6,8
4	64,2	65,0	9,2	-5,0
5	49,0	51,0	-6,0	-19
6	55,4	56,7	0,4	-13,3
7	50,3	56,9	-4,7	-13,1
8	67,3	70,0	12,3	0,0
9	63,3	64,6	8,3	-5,4

В условиях стесненной застройки измерительный микрофон располагался на меньшем расстоянии, но не ближе 1 м от стен зданий, сплошных заборов и других сооружений или элементов рельефа, отражающих звук. Измерение продолжали до стабилизации показаний измерительного прибора в пределах выбранной точности измерений, но не менее 5 мин.

Результаты исследования по второму методу. Полученные значения уровней шума в расчётных точках сведены в таблицу 5.

Результаты натурных измерений соответствуют полученным расчётным данным. Таким образом, можно подтвердить ранее сделанное заключение о том, что существующие шумозащитные мероприятия являются недостаточными, жилая застройка рассматриваемого участка находится в зоне шумового дискомфорта.

Следует обратить внимание на то, что в формирование звукового поля селитебных территорий, примыкающих к транспортной развязке по ул. 15-я Рабочая в г. Омске, вносит вклад не только шум автотранспортных потоков, но и подвижной состав железнодорожного транспорта, осуществляющий периодическое движение на расстоянии 40–45 м от жилой застройки. Измерения показали, что во время движения поезда суммарный уровень шумового воздействия в 1,5–2 раза превышал сверхнормативное значение, установленное для автотранспорта. При этом какой-либо способ защиты селитебных территорий от шума подвижного состава железнодорожного транспор-

та на этом участке отсутствует, хотя исследования и рекомендации на этот счёт имеются [18, 19].

Наряду с натурными измерениями был проведен опрос методом интервьюирования жителей, проживающих на селитебных территориях, прилегающих к транспортной развязке. В опросе приняли участие более 25 человек, длительно проживающих на данной территории. Все опрошенные единогласно утверждают, что не заметили эффекта снижения уровня шума от установленных АЭ как в дневное, так и в ночное время. Некоторые интервьюируемые, являющиеся участниками дорожного движения, указали на негативное влияние установленных АЭ на дорожную ситуацию.

Причины неэффективной работы шумозащитных экранов на рассматриваемом объекте и рекомендации для устранения этих причин:

1. Большое количество разрывов в шумозащитных экранах для местных проездов к частным домам значительно снижает эффективность АЭ. Длина шумозащитного экрана должна обеспечивать снижение эквивалентных уровней звука до расчётных значений. Она зависит от расстояния между осью ближайшей полосы движения транспортных средств и застройкой, а также от прогнозируемого снижения эквивалентного уровня звука. Минимальная длина шумозащитного экрана должна составлять в каждую сторону не менее четырёх расстояний от проезжей части до расчётной точки (рисунок 4 [13]), при этом быть не менее 100 м.

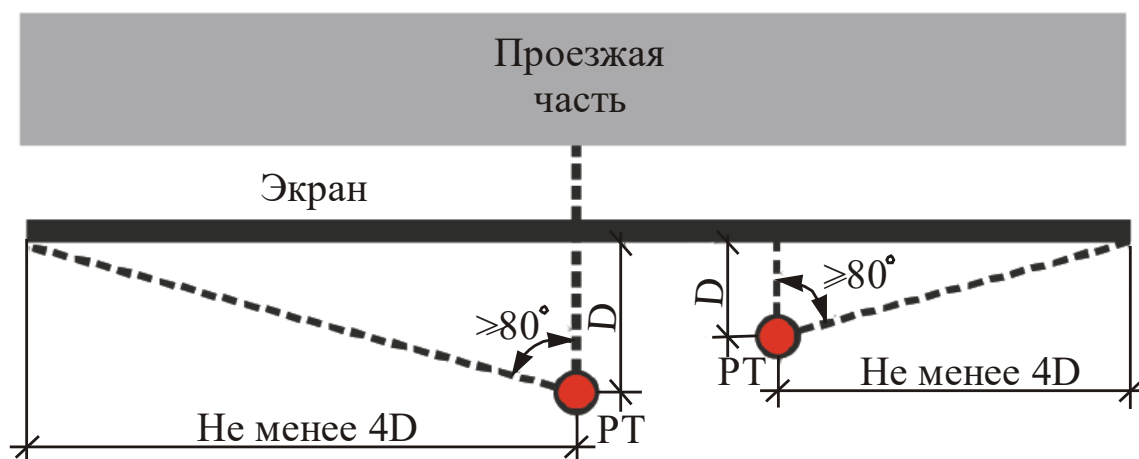


Рисунок 4 – Минимальная длина шумозащитного экрана: D – расстояние от экрана до расчётной точки

Figure 4 – Minimum length of the noise screen: D – distance from the screen to the calculation point

Минимальную длину отгона шумозащитного сооружения **можно** определять по номограмме, приведённой в работе [13], в зависимости от расстояния между осью ближайшей полосы движения и застройкой.

Длина шумозащитного сооружения может быть уменьшена, если его концы отогнуты в плане в сторону от источника шума (рисунок 5).

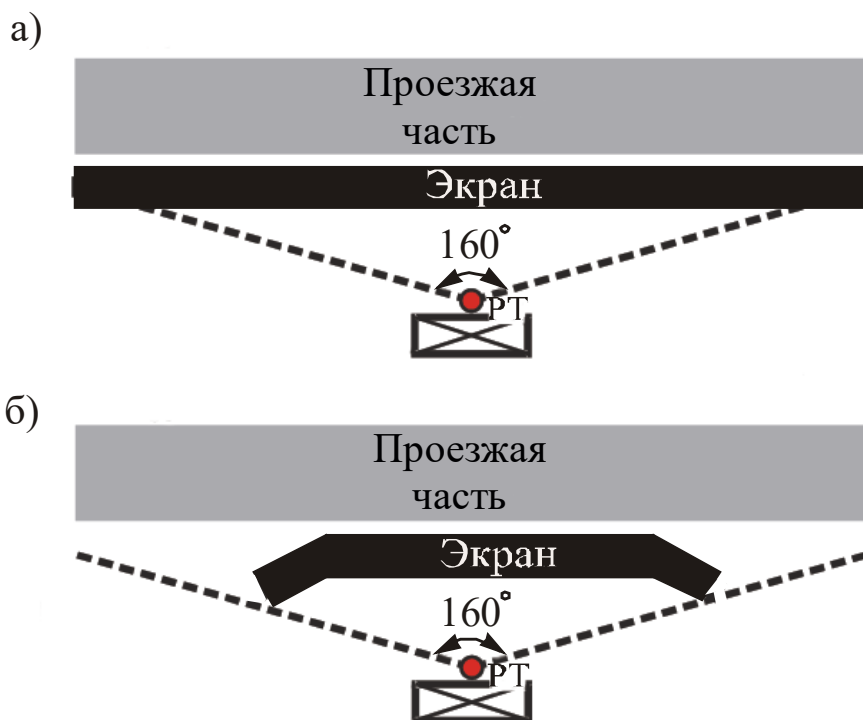


Рисунок 5 – Искривление экрана в сторону защищаемого участка от источника шума:
а – прямое в плане очертание экрана; б – ломаное очертание экрана

Figure 5 – The curvature of the screen in the direction of the protected area from the noise source:
a – straight outline of the screen in the plan; b – broken outline of the screen

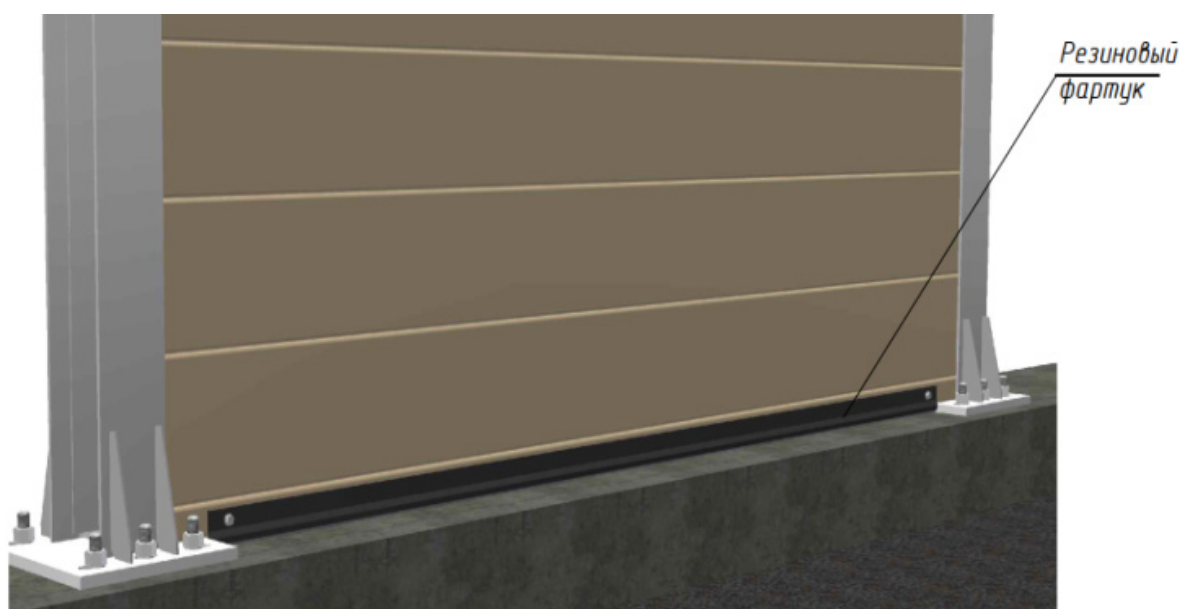


Рисунок 6 – Нарушение сплошности экрана Рисунок 7 – Резиновый фартук

Figure 6 – Screen soundness breakdown Figure 7 – Rubber apron

Для решения этой проблемы рекомендуется применение специальных раздвижных ворот для одновременного обеспечения сплошности экранов и возможности проезда во дворы. Однако применение шумозащитных ворот сопряжено с рядом проблем, главная из них – открывание ворот при заезде. На рассматриваемом участке нет возможности совершить остановку, не создавая помех движению транспорта. Возможным решением

этой проблемы является устройство местного проезда вдоль жилой застройки, но для рассматриваемого случая этот вариант не везде является неприемлемым из-за ограниченного расстояния между жилой застройкой и экранами.

2. Еще одна выявленная причина недостаточной эффективности АЭ – наличие щелей между фундаментом и экраном (рисунок 6). Согласно [13], увеличение ширины щели от

0,1 до 0,5 м снижает акустическую эффективность шумозащитного экрана на 5–6 дБ. Снижение эффективности экранов по интегральному значению может достигать от 5 до 12 дБА. Для устранения данного недостатка можно применить специальный резиновый фартук (рисунок 7).

3. Третья причина недостаточной эффективности установленных шумозащитных экранов, с нашей точки зрения, заключается в использовании для их изготовления не лучших звукопоглощающих и изолирующих материалов [8, 9, 20, 21]. Причём обвинять в этом ни заказчика, ни проектировщиков, ни исполнителей нельзя, т.к. они вынуждены выбирать из конкурсных предложений самые дешёвые материалы, без глубокого изучения их эффективности.

4. В цивилизованных странах и некоторых городах РФ в процессе проектирования объектов транспортной инфраструктуры используют математическое моделирование и карты шумового воздействия на окружающее пространство [22, 23]. Такой подход позволяет дать комплексную оценку вероятности (риска) возникновения шумового загрязнения от транспортного потока и других источников шума и назначить необходимые мероприятия для устранения или смягчения этого воздействия.

Представляет интерес предложение [9] использовать для верхней части шумозащитных экранов солнечные панели для независимого энергообеспечения освещения на участках установки АЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сопоставление расчётных и экспериментальных результатов оценки шумового воздействия автотранспорта на рассматриваемом объекте показало, что эти результаты близки. Следовательно, квалифицированное прогнозирование эффективности, мер шумозащиты по действующим нормативам может дать адекватные результаты при проектировании транспортных объектов.

2. Анализ эффективности применения шумозащитных экранов на примере транспортной развязки по ул. 15-я Рабочая в г. Омске показал, что эти элементы транспортной инфраструктуры не в полной мере выполняют свои защитные функции. Население, проживающее на селитебных территориях, примыкающих к данной развязке, подвергается повышенному воздействию уровня транспортного шума.

3. Селитебные территории, примыкающие к транспортной развязке по ул. 15-я Рабочая в г. Омске, находятся в зоне воздействия звукового поля, формирующегося не только под влиянием шума транспортного потока, но и шума подвижного состава железнодорожного транспорта. Это обстоятельство не учтено при выборе способа шумозащиты на этапе проектирования.

4. Стоимость строительства 1 погонного метра шумозащитных экранов (в зависимости от высоты и применяемых материалов) составляет от 25 до 80 тыс. руб. Общая протяжённость экранов на рассматриваемой развязке составляет около 1500 тыс. м. Таким образом, на эти элементы транспортной инфраструктуры затрачено около 40 млн руб. без получения требуемого эффекта. На устранение допущенных ошибок проектирования и монтажа шумозащитных экранов потребуются дополнительные материальные затраты.

С учётом вышеизложенного, считаем целесообразным рассмотреть вопрос о реконструкции системы шумозащиты на рассмотренной транспортной развязке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Психофизиологические механизмы формирования и развития функциональных состояний // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2014. Т. 100. № 10. С. 1130–1137.
2. Асминин В.Ф., Корда У.Ю. Анализ путей снижения шума в сложившейся жилой застройке, прилегающей к остановочным пунктам общественного транспорта // Научный вестник Воронежского архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. №4(20). С. 141– 145.
3. Евгеньев Г.И. Применение шумозащитных экранов на автомобильных дорогах США // Обзорная Информация Автомобильные дороги и мосты. 2005. №5. С. 50.
4. Highway Noise Barriers: Performance, Maintenance and Safety (Video). Cambridge, MA: John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1996. October.
5. Noise wall design guideline. Design guideline to improve the appearance of noise walls in NSW // March 2016.
6. Bahman Daee. Application of Polyurethane Products in Accelerated Construction of Innovative Noise Barrier. Western Graduate and Postdoctoral Studies // Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2864. 2015.
7. Fleming G.G., Knauer H.S., Lee C.S.Y., Pedersen S. Highway Noise Barrier Design Handbook. [http:// www.fhwa. dot.gov/environment/noise/design/ index. htm](http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/design/index.htm).
8. Hanson C.E., Towers D.A., and Meister L.D. (2006). Transit Noise and Vibration Impact

Assessment. Report № FTA-VA-90-1003-06, prepared by Harris Miller Miller & Hanson, Inc., Burlington, MA, for the Federal Transit Administration, Washington, DC. Available at <http://acousticstoday.org/manual>. Accessed September 1, 2016.

9. Goines L., Hagler L. (2007) Noise Pollution: A Modern Plague. Southern Medical Journal [online]. 100 (3), pp. 287–294. Available from: <http://docs.wind-watch.org/goineshaglernoisepollution.html> [Accessed 16 January 2017].

10. Questim D. Assessing the acoustic durability of noise barriers on NRA road networks" Phil Morgan, June 2014, TRL, UK.

11. Минаева В.В., Гапоненко А.В. Влияние шума на организм человека // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3. С.56 – 58.

12. Степанова Е.А., Абрамова И.А. Субъективная оценка внутрижилищной акустической среды населением, проживающим на урбанизированных примыкающих территориях // Омский научный вестник. 2004. № 3. С. 76 –79.

13. Шашурин А.Е. Новые технические и технологические решения для снижения акустического загрязнения шумозащитными экранами: монография. Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2018. -134 с. -ISBN 978-5-907054-27-1. -Текст: электронный. Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/122102> (дата обращения: 19.04.2020). Режим доступа: для авториз. пользователей.

14. Вопросы звукоизоляции и архитектурной акустики [Текст]: [Сборник статей] / Акад. строительства и архитектуры СССР. Науч.-исслед. ин-т строит. физики и ограждающих конструкций; под ред. канд. техн. наук В.Н. Никольского. Москва: Госстройиздат, 1959. 156 с.

15. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Драган С.П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т.12. №1(43). С.90–93.

16. Иванов Н.И. Проблема шума в современной цивилизации // Строительная физика в XXI веке: материалы научно-технической конференции / под ред. И.Л. Шубина. М.: НИИСФ РААСН, 2006. С. 39–42.

17. Рощина Н.В. Нормативные требования к шумозащитным акустическим экранам // Noise theory and practice. 2017. 3(9). Том 3. С. 46– 49.

18. Кузлин Д.А., Тюрина А.В. Исследование акустических экранов для снижения шума поездов // Безопасность жизнедеятельности: научно-практический журнал. М.: Новые технологии. 2009. №8. С.30–34.

19. Манаков А.Л., Карпущенко Н.И., Величко Д.В. Снижение уровня шума вблизи железной дороги // Путь и путевое хозяйство. 2020. №3. С. 11–15.

20. Дейнега И.Н., Мараховский С.С. Композитные полимерные материалы в конструкциях шумозащитных экранов // Дороги. Инновации в строительстве. 2016. №2. С.100–102.

21. Федяев А.А., Дейнега И.Н. К эффективности шумозащитных экранов // Дороги. Инновации в строительстве. 2017. №62. С.20–23.

22. Кокодеева Н.Е., Никулушкин А.А. О законе распределения и оценке степени риска шумовой характеристики от транспортного потока // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2014. №1 (5). С. 6–16.

23. Крикун С.Н., Пугачёв И.Е. Математическая модель оценки транспортного шума // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. №1 (87). С.35–37.

REFERENCES

1. Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Kukushkin Ju.A. Psihofiziologicheskie mekhanizmy formirovaniya i razvitiya funkcional'nyh sostojanij [Psychophysiological mechanisms of formation and development of functional conditions]. *Rossiiskij fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2014;100. № 10:1130-1137 (in Russian).

2. Asminin V.F., Korda U.Ju. Analiz putej snizheniya shuma v slozhivshejsja zhiloj zastrojke, priliegajushhej k ostanovochnym punktam obshhestvennogo transporta [Analysis of ways to reduce noise in the current residential buildings that are adjacent to public transport stops]. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2010; 4(20): 141-145 (in Russian).

3. Evgen'ev G.I. Primenenie shumozashhitnyh jekranov na avtomobil'nyh dorogah SShA [The use of noise screens on highways of the USA]. *Obzornaja Informacija Avtomobil'nye dorogi i mosty*. 2005; 5: 50 (in Russian).

4. Highway Noise Barriers: Performance, Maintenance and Safety (Video). Cambridge, MA: John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1996. October.

5. Noise wall design guideline. Design guideline to improve the appearance of noise walls in NSW. March 2016.

6. Bahman Daei. Application of Polyurethane Products in Accelerated Construction of Innovative Noise Barrier. Western Graduate and Postdoctoral Studies. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 2864. 2015.

7. Fleming G.G., Knauer H.S., Lee C.S.Y., Pedersen S. Highway Noise Barrier Design Handbook. <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/design/index.htm>.

8. Hanson C.E., Towers D.A., and Meister L.D. (2006). Transit Noise and Vibration Impact Assessment. Report № FTA-VA-90-1003-06, prepared by Harris Miller Miller & Hanson, Inc., Burlington, MA, for the Federal Transit Administration, Washington, DC. Available at <http://acousticstoday.org/manual>. Accessed September 1, 2016.

9. Goines L., Hagler L. Noise Pollution: A Modern Plague. Southern Medical Journal [online]. 2007; 100 (3): 287–294. Available from: <http://docs.wind-watch.org/goineshaglernoisepollution.html> [Accessed 16 January 2017].

10. Questim D. Assessing the acoustic durability of noise barriers on NRA road networks" Phil Morgan, June 2014, TRL, UK.

11. Minaeva V.V., Gaponenko A.V. Vlijanie shuma na organizm cheloveka [The influence of noise on the human body]. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2015; 3: 56–58 (in Russian).

12. Stepanova E.A., Abramova I.A. Sub'ektivnaja ocenka vnutrizhilishhnoj akusticheskoy sredy nasele-niem, prozhivajushim na urbanizirovannyh primagistral'nyh territorijah [A subjective assessment of the intragilistic acoustic environment by the population living on urbanized areas close to the highways]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2004; 3: 76–79 (in Russian).

13. Shashurin A.E. *Novye tehnicheckie i tehnologicheskije reshenija dlja snizhenija akusticheskogo zagrazhdenija shumozashhitnymi jekranami: monografija* [New technical and technological solutions for reducing acoustic pollution with noise-proof screens: monograph.]. Sankt-Peterburg: BGU "Voenmeh" im. D.F. Ustinova, 2018: 134. ISBN 978-5-907054-27-1. Available at: <https://e.lanbook.com/book/122102> (accessed: 19.04.2020). (in Russian)

14. *Voprosy zvukoizoljatsii i arhitekturnoj akustiki* [The issues of sound insulation and architectural acoustics]. Akad. stroitel'stva i arhitektury SSSR. Nauch. issled. in-t stroit. fiziki i ograždajushih konstrukcij; Pod red. kand. tehn. nauk V.N. Nikol'skogo. Moscow: Gosstrojizdat, 1959: 156 (in Russian).

15. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Dragan S.P. Aktual'nye problemy zashhity naselenija ot nizkochastotnogo shuma i infrazvuka [Actual issues of population protection from low-frequency noise and infrasound]. *Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2015; 12. №1(43): 90–93 (in Russian).

16. Ivanov N.I. Problema shuma v sovremennoj civilizatsii [The problem of noise in modern civilization // Construction physics in the 20th century: materials of scientific and technical conference]. *Stroitel'naja fizika v XXI veke: mezhduнародnye nauchno-tehnicheskie konferencii / pod red. I.L. Shubina*. M.: NIISF RAASN, 2006: 39–42 (in Russian).

17. Roshchina N.V. Normativnye trebovaniya k shumozashhitnym akusticheskim jekranam [Normative requirements for noise-proof acoustic screens]. *Noise theory and practice*. 2017; 3(9). Tom 3: 46–49. (in Russian)

18. Kuklin D.A., Tjurina A.V. Issledovanie akusticheskikh jekranov dlja snizhenija shuma poezdov [Research of acoustic screens for reducing train noise]. *Bez-opasnost' zhiznedejatel'nosti: nauchno-prakticheskij zhurnal*. 2009; 8: 30–34 (in Russian).

19. Manakov A.L., Karpushhenko N.I., Velichko D.V. Snizhenie urovnja shuma vblizi zheleznoj dorogi [Reducing the noise level near the railway]. *Put' i putevye hozjajstvo*. 2020; 3: 11–15 (in Russian).

20. Dejnega I.N., Marahovskij S.S. Kompozitnye polimernye materialy v konstrukcijah shumozashhitnyh jekranov [Composite polymer materials in the construction of noise screens. Roads]. *Dorogi. Innovacii v stroitel'stve*. 2016; 2: 100–102 (in Russian).

21. Fedjaev A.A., Dejnega I.N. K jeffektivnosti shumozashhitnyh jekranov [To the effectiveness of noise screens]. *Dorogi. Innovacii v stroitel'stve*. 2017; 62: 20–23 (in Russian).

22. Kokodeeva N.E., Nikulushkin A.A. O zakone

raspredelenija i ocenke stepeni riska shumovoj harakteristiki ot transportnogo potoka [On the law of distribution and assessment of the risk of noise characteristics from the transport flow]. *Tehnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2014; 1 (5): 6–16 (in Russian).

23. Krikun S.N., Pugachjov I.E. Matematicheskaja model' ocenki transportnogo shuma [A mathematical model of transport noise assessment]. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*. 2019; (87): 35–37 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Шевелёв Дмитрий Александрович – Обследование объекта, экспериментальные исследования, анализ источников, расчёты, написание статьи.

Сиротюк Виктор Владимирович – Общее руководство, постановка цели, методов исследования, анализ источников, написание и редактирование статьи.

Геращенко Елена Александровна – Обследование объекта, экспериментальные исследования, расчёты.

Степанова Елена Андреевна – Консультации, методика и экспериментальные исследования, редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dmitry A. Shevelev – object survey, experimental studies, sources analysis, calculations, writing of the article.

Viktor V. Sirotiuk – overall management, purpose setting, research methods, source analysis, writing and editing of the article.

Elena A. Gerashchenko – object survey, experimental research, calculations.

Elena Stepanova – consultations, methods and experimental research, editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевелёв Дмитрий Александрович – магистрант группы См-19МА7 Института магистратуры и аспирантуры ФГБОУ ВО «СИБАДИ» (644080, г. Омск, проспект Мира, 5, e-mail: dimashevelev97@gmail.com).

Сиротюк Виктор Владимирович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО «СИБАДИ» Scopus Author ID 6602369365, Researcher ID B-7877-2019 (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sirvv@yandex.ru).

Геращенко Елена Александровна – магистрант группы См-19МА7 Института магистратуры и аспирантуры ФГБОУ ВО «СИБАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: elenageraschenko1@yandex.ru).

Степанова Елена Андреевна – канд. биол. наук, доц. кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» ФГБОУ ВО «СИБАДИ» (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: elestep@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dmitry A. Shevelev (Omsk, Russia.) – Master Candidate of the Sm-19MA7 group, the Institute of Master and Post-graduate Studies of SibADI (644080, Omsk, Mira prospekt, 5., e-mail: dimashevelev97@gmail.com).

Viktor V. Sirotiuk (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Professor of the Road Design Department of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” Scopus Author ID 6602369365, Researcher ID B-7877-2019 (644008, Omsk, Mira prospekt, 5, e-mail: sirvv@yandex.ru).

Elena A. Gerashchenko (Omsk, Russia) – Master Candidate of the Sm-19MA7 group, the Institute of Master and Post-graduate Studies of SibADI (644080, Omsk, Mira prospekt, 5., e-mail: elenageraschenko1@yandex.ru).

Stepanova A. Elena (Omsk, Russia) – Cand. of Sci., Associate Professor of the Technosphere and environmental safety Department of SibADI (644008, Omsk, Mira prospekt, 5, e-mail: elestep@rambler.ru).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Библиографический список (References)

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректур статей авторам не высылаются, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.