

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 17, № 5. 2020
Сквозной номер выпуска – 75
Vol. 17, no. 5. 2020
Continuous issue – 75

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-5

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 17, № 5. 2020. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 75
(VOL. 17, NO. 5. 2020. CONTINUOUS ISSUE – 75)**

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 ВИНТИ 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 27.10.2020. Дата выхода в свет 31.10.2020. 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 27.10.2020. Publication date is 31.10.2020. 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

Черкашина Валентина Сергеевна 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. Sirotyuk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

Scopus Author ID 6602369365, **Researcher ID** B-7877-2019

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

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

Zhirgalbek 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

Valentina S. Cherkashina
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Р.Ф. Салихов, В.Н. Кузнецова, В.В. Дубков

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРТНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК
МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ 550**

И.С. Тюремнов, Д.В. Федорова

**ОБЗОР РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАВЕСНЫХ ЭКСКАВАТОРНЫХ ВИБРОПЛИТ
ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВ..... 562**

В.Н. Кузнецова, Р.В. Романенко

**ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
ТРАНСМИССИЕЙ..... 574**

В.А. Роцин, С.Д. Иванов, А.Н. Назаров

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ
В ПРИБОРАХ БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ НА ПРИМЕРЕ КРАНОВОГО
АНЕМОМЕТРА..... 584**

В.А. Николаев

**АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ НИЖНЕГО НОЖА КОВША АГРЕГАТА
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ 598**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

О.В. Максимова, В.А. Гинзбург, В.М. Лытов

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ОТ АВТОТРАНСПОРТА
И ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К СТРУКТУРИРОВАНИЮ АВТОПАРКА 612**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.А. Лунёв, Д.А. Разуваев, В.В. Голубенко, М.Г. Чахлов

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ
СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 624**

Ю.В. Краснощеков

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН
И ФУНКЦИЙ 636**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Rinat F. Salikhov, Victoria N. Kuznetsova, Valerii V. Dubkov

**EXPERT ASSESSMENT RESULTS ANALYSIS OF MACHINES POWER UNITS
IN WINTER CONDITIONS..... 551**

I.S. Tiuremnov, D.V. Fedorova

**REVIEW OF MANUFACTURERS' RECOMMENDATIONS ON TECHNOLOGICAL
CAPABILITIES OF EJECTABLE EXCAVATOR VIBROPLATES ASSESSMENT
DURING SOIL COMPACTION 563**

V.N. Kuznetsova, R.V. Romanenko

**BASIC ASPECTS OF METHODOLOGY FOR JUSTIFYING.
THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF.
A TRACKED MACHINE WITH ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION 575**

V.A. Roshchin, S.D. Ivanov, A.N. Nazarov

**HAZARD FORECASTING TECHNIQUES IMPLEMENTATION
IN CRANE SAFETY INSTRUMENTS USING A CRANE ANEMOMETER..... 585**

Vladimir A. Nikolaev

**INTERACTION ANALYSIS OF BUCKET BOTTOM KNIFE WITH SOIL
TO BUILD UP SUBBASE 599**

PART II. TRANSPORT

O.V. Maksimova, V.A. Ginzburg, V.M. Lytov

**COMPARISON OF METHODS FOR VEHICLE EMISSIONS CALCULATION
AND THEIR SENSITIVITY TO FLEET STRUCTURING..... 613**

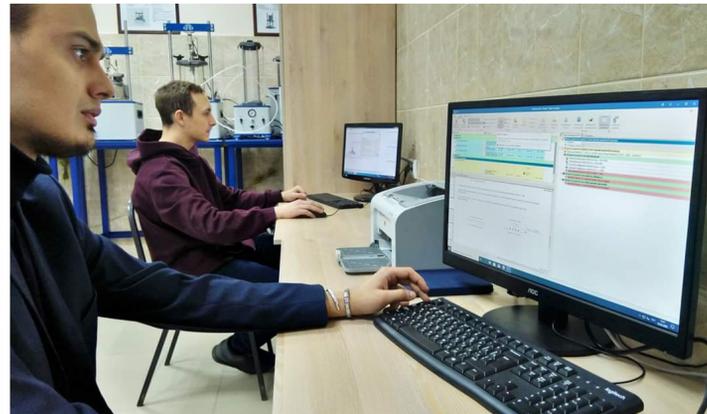
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Aleksandr A. Lunev, Denis A. Razuvaev, Vladimir V. Golubenko, Mikhail G. Chakhlov

**PREDICTING THE FROST HEAVING OF BOTTOM ASH VALUE FOR
ROAD DESIGN 625**

Yuri V. Krasnoshchekov

**PROBABILITY CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES CONSIDERING
ASYMMETRY OF RANDOM VALUES AND FUNCTIONS DISTRIBUTION 637**



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



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

УДК 621.436

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-550-561>

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРТНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Р.Ф. Салихов*, В.Н. Кузнецова, В.В. Дубков
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
*salikhorinat@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнение производственных и технологических процессов машин на обширной территории Российской Федерации связано с необходимостью их эксплуатации в условиях отрицательных температур. В статье рассматриваются результаты прикладных научных исследований факторов, оказывающих отрицательное влияние на процесс работы двигателей внутреннего сгорания при низких температурах окружающего воздуха. Использование современных методов и средств диагностики цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма двигателя позволяют достоверно установить причины отказов двигателей.

Материалы и методы. В ходе выполнения экспериментальных исследований использовались метод неразрушающего контроля, органолептический, измерительный, экспертный методы.

Результаты. В результате комплексной оценки причин отказов двигателей было установлено, что нарушения в применении несоответствующих эксплуатационных материалов при низких температурах, мероприятий по подготовке к пуску дизель-генераторных установок явились основной причиной несвоевременного запуска и появления дефектов элементов цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма, в итоге приведшие к аварийному выходу из строя двигателей внутреннего сгорания.

Обсуждение и заключение. Предложенные результаты исследований позволят конкретизировать перспективы развития в области обеспечения надежности эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двигатель внутреннего сгорания, холодный климат, отрицательные температуры, диагностика, надежность.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Поступила 03.06.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: Салихов Р.Ф., Кузнецова В.Н., Дубков В.В. Анализ результатов экспертной диагностики силовых установок машин, эксплуатируемых в зимних условиях. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-550-561>

© Салихов Р.Ф., Кузнецова В.Н., Дубков В.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-550-561>

EXPERT ASSESSMENT RESULTS ANALYSIS OF MACHINES POWER UNITS IN WINTER CONDITIONS

Rinat F. Salikhov*, Victoria N. Kuznetsova, Valerii V. Dubkov
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
*salikhorinat@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The implementation of production and technological processes of machines on the vast territory of the Russian Federation is related to the necessity to operate them in low temperatures conditions. The article presents the results of the applied scientific research of the factors that have a negative impact on the operation process of internal combustion engines at low ambient temperatures. The use of the modern methods and means of diagnostics of the cylinder-piston group and the crank- engine mechanism make it possible to reliably establish the causes of the internal combustion engines failures.

Materials and methods. In the course of the experimental studies the non-destructive testing, organoleptic, measuring and expert methods were used.

Results. As a result of a comprehensive assessment of the engine failures causes, it was found that the breakdowns in the use of inappropriate operating materials at low temperatures, measures to prepare for the launch of diesel generator sets were the main reason for untimely start-up and the faults in cylinder-piston group and the crank mechanism elements, which led to emergency failure of the internal combustion engine.

Discussion and conclusion. The proposed research results will make it possible to specify the development prospects in the field of providing the reliability of internal combustion engines operation.

KEYWORDS: Internal combustion engine, cold climate, low temperatures, diagnostics, reliability.

GRATITUDES. The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article.

Submitted 03.06.20, revised 23.10.2020.

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: Rinat F. Salikhov, Victoria N. Kuznetsova, Valerii V. Dubkov. Expert assessment results analysis of machines power units in winter conditions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-550-561>

© Salikhov R.F., Kuznetsova V.N., Dubkov V.V.



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

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях работы предприятий строительной отрасли важным является повышение эффективности использования основных фондов и в первую очередь машин и оборудования. При этом основное направление развития строительного производства заключается в непрерывном подъеме уровня механизации и автоматизации производственных процессов за счет внедрения современных, прогрессивных технологий, что связано с применением все более сложных машин, их специализированных комплектов, технологических комплексов и систем их управления.

Одной из таких многочисленных проблем является эксплуатация машин в зонах умеренно-холодного климата, какими являются районы Сибири и Дальнего Востока, и в экстремальных климатических условиях Крайнего Севера и Арктики [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 12].

В настоящее время одним из актуальных вопросов эксплуатации двигателей внутреннего сгорания строительных машин и оборудования является сокращение ущерба от вынужденных внезапных отказов. Особенно высокая вероятность поломок наблюдается в послеремонтный период. Основными причинами их возникновения являются применение неоригинальных деталей, не отвечающих заданным нагрузкам, несоблюдение технологии проведения ремонта, неполный перечень выполняемых контрольно-измерительных операций в ходе проведения диагностики и ремонта, нарушение правил технической эксплуатации, особенно усугубляющихся в условиях низких температур. Как правило, при соблюдении режимов технической эксплуатации возникновения внезапных отказов резко сокращается.

Эксплуатация двигателей машин в условиях холодного климата и отрицательных температур окружающего воздуха связана с наличием [13, 14, 15] ухудшения условий самовоспламенения и смесеобразования дизельного топлива; увеличением вязкости моторного, трансмиссионного масел и рабочих жидкостей; возрастанием момента сопротивления проворачиванию коленчатого вала двигателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для работы машин на строительных площадках различных отраслей промышленности, при строительстве и ремонте трубопро-

водов, работе землеройной техники, бурении грунтов используются дизель-генераторные установки. Строительные машины и оборудование, работающие от автономной электросети, могут простаивать по причине потери исправного или работоспособного состояния дизель-генераторных установок (рисунок 1), особенно при работе в условиях низких температур. Поэтому важным является проведение качественной оценки их технического состояния.



Рисунок 1 – Дизель-генераторная установка Caterpillar 3512

Figure 1 – Caterpillar 3512 Diesel Generator Set

Исследованный тип поршня комбинированный: головка изготовлена из стали, юбка – из чугуна, материал гильзы – чугун. Для охлаждения и измерений размеров деталей цилиндра-поршневой группы после охлаждения использовалась климатическая камера «Климат CM-75/180-120 TX» (рисунок 2), пирометр Raytek ST25, микрометр МК 150-175 0,01, нутромер микрометрический НМТ-3-6 0,001.



Рисунок 2 – Климатическая камера

Figure 2 – Climatic chamber

РЕЗУЛЬТАТЫ

Было установлено, что в случае нарушения эксплуатационных требований в зимних

условиях и из-за влияния неблагоприятных климатических факторов могут возникнуть следующие неисправности и отказы:

- частичная или полная разморозка двигателя;
- осмоление деталей двигателей во время их непрерывной работы при низких отрицательных температурах;
- появление трещин в головке цилиндров на стенках кожухов охлаждения двигателя из-за внезапного изменения температуры и проявления тепловых напряжений;
- износ или поломка зубчатых колес и других частей зубчатых колес стартера;
- внезапный выход из строя двигателя и стартера из-за перегрузки или увеличения времени запуска;
- увеличение отложений накипи с частой заменой охлаждающей жидкости;
- прекращение подачи топлива из-за образования парафиновых отложений в трубах и фильтрах системы подачи топлива;
- уменьшение плотности электролита, уменьшение емкости аккумуляторных батарей, появление трещин в крышке и в корпусе батареи, разрушение положительного и отрицательного электродов;
- разрушение резиновых и пластиковых деталей;
- выход из строя деталей редукторов из-за отвердения жира и повышенной нагрузки;
- поломка узлов и деталей ходовой части из-за забивания снегом и льдом;
- повышение интенсивности изнашивания цилиндро-поршневой группы при пусках двигателя.

Так, в частности, авторами статьи был проведен анализ причин внезапных отказов дизель-генераторной установки Caterpillar 3512. Послеремонтная продолжительность эксплуатации исследуемых дизель-генераторных установок составила 5 месяцев, в том числе 2 месяца – при низких температурах окружающего воздуха. Для установления конкретных причин отказа двигателя внутреннего сгорания дизель-генераторной установки Caterpillar 3512 в условиях ее использования при низких температурах окружающего воздуха была проведена его экспертная диагностика.

Для экспертного исследования были представлены гильзы и поршни трех двигателей дизель-генераторной установки марки Cat 3512, часть из которых представлена на рисунках 3, 4.



Рисунок 3 – Гильзы одного из ДВС дизель-генераторной установки Caterpillar 3512

Figure 3 – Sleeves of Caterpillar 3512 Diesel Generator Set



Рисунок 4 – Поршни дизель-генераторной установки Caterpillar 3512

Figure 4 – Pistons of Caterpillar 3512 Diesel Generator Set

В ходе проведения органолептической и измерительной экспертизы гильз цилиндров были выявлены следы коррозии и налип с их внешней стороны. На внутренней полости обнаружены локальные задиры по всей поверхности в области сопряжения гильзы и юбки поршня (рисунок 5). Имелись повреждения уплотнительных колец (расслоение и их удлинение вследствие термических воздействий). Выявлены прижоги в области юбки поршня и сопряженной с ней поверхностью гильзы.



Рисунок 5 – Задирки на юбке поршня и внутренней полости гильзы

Figure 5 – Scuffings on the piston skirt and inner cavity of the sleeve

Обнаружены залегания поршневых колец, наблюдался нагар на огневом поясе, поломка маслосъёмных колец.

Для измерения внутренних диаметров гильз использовался нутромер НМ 75-175 0.01. Измерения производились по стандартной методике (рисунок 6).



Рисунок 6 – Положение нутромера при замерах внутренних диаметров гильз цилиндров

Figure 6 – The position of the inside gauge when measuring the inner diameters of the sleeves

В результате анализа величины износа неповрежденных сопряжений цилиндро-поршневой группы выяснилось, что средний зазор составляет 0,27 мм, максимальный 0,34 мм. Учитывая то, что номинальный зазор при сборке сопряжения «поршень – гильза цилиндра» должен находиться в диапазоне 0,17 ... 0,25 мм, можно сделать вывод о том, что исследуемые двигатели были собраны после ремонта с учетом требуемых допусков и поэтому отработали после ремонта достаточно продолжительный срок без поломок. Зазоры в цилиндрах вышли за установочные пределы, но при этом имеют достаточный запас по ресурсу до окончания текущего межремонтного цикла.

Однако разность степени изнашивания цилиндро-поршневой группы по отдельным цилиндрам превышает 30%, что свидетельствует о неравномерном износе и требует в дальнейшем большего внимания при их ди-

агностировании в ходе эксплуатации. Максимальная разность диаметров (овальность) некоторых гильз в двух взаимно перпендикулярных плоскостях составляет от 0,9 до 0,1 мм, что является недопустимым для их дальнейшего применения.

Измерения внутренних диаметров гильз, наружных диаметров поршней позволили определить зазоры цилиндро-поршневой группы в верхнем, среднем и нижнем поясах (рисунок 7). Граница верхнего пояса расположена на расстоянии 10 мм от верхнего торца гильзы; нижнего – на расстоянии 10 мм от нижнего торца гильзы; граница среднего пояса – середина гильзы цилиндра.

Установлено, что из общего количества только 44% имеют типичную картину износа. У остальных наблюдается такая динамика: 17% – одинаковый износ во всех поясах, 28% – наибольший износ в среднем поясе, 5% – наибольший износ в нижнем поясе (рисунок 7).

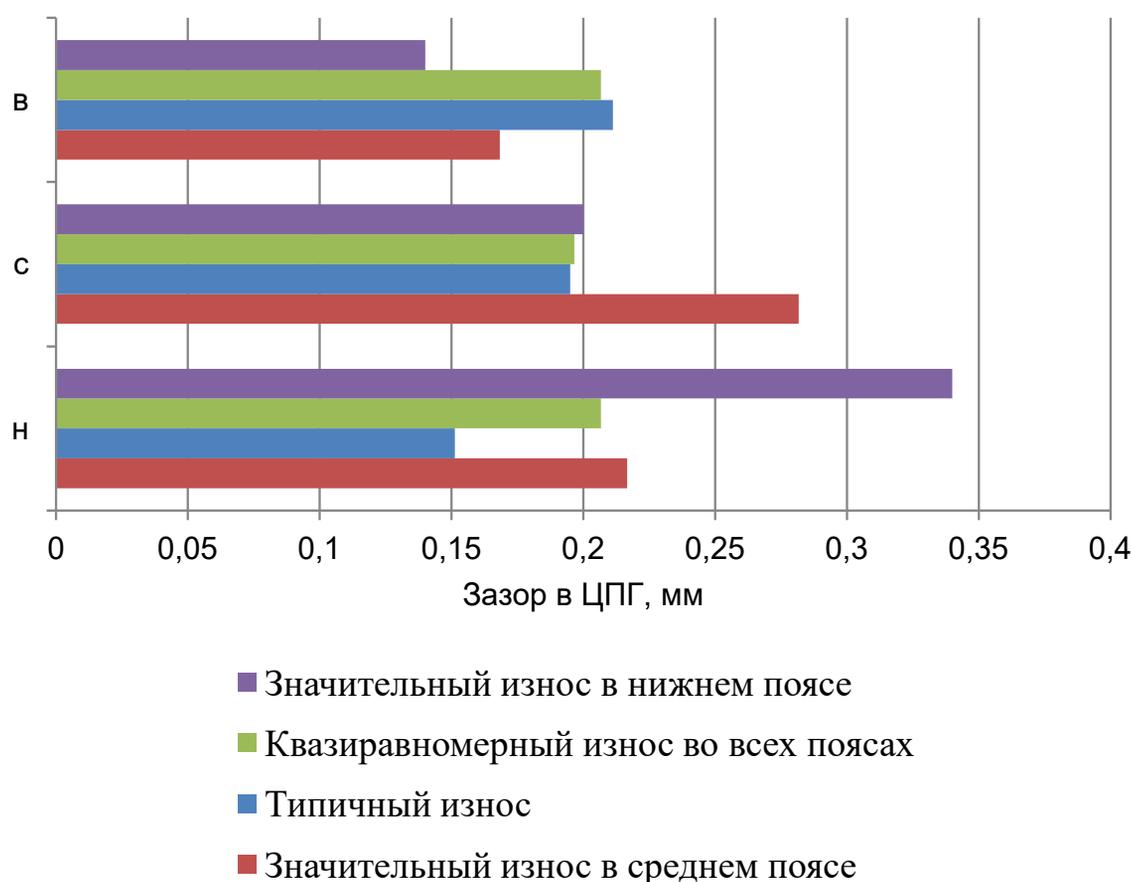


Рисунок 7 – Динамика изменения зазоров цилиндро-поршневой группы

Figure 7 – Dynamics of changes in the clearances of the cylinder-piston group

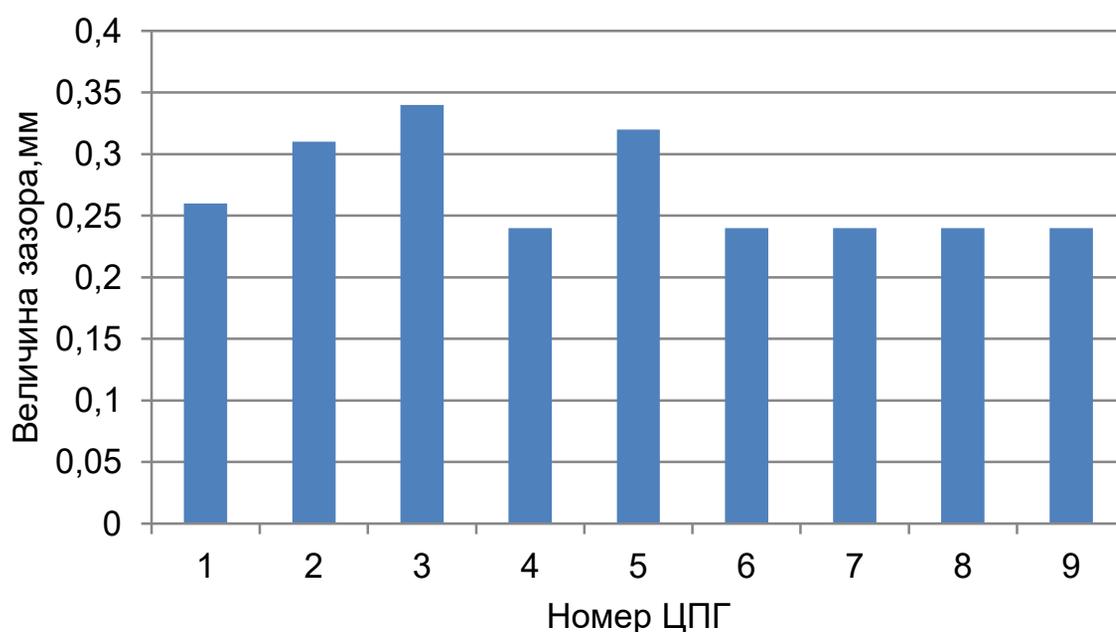


Рисунок 8 – Величины зазоров цилиндро-поршневой группы

Figure 8 – Clearance values of the cylinder-piston group

Как правило, наибольшей величине износа подвергается верхний пояс гильзы. Однако это не всегда наблюдается исходя из результатов проведенных измерений. Ниже приведены величины зазоров исследованных цилиндро-поршневой группы (рисунок 8).

Такие вариации динамики изнашивания в верхнем, среднем и нижнем поясах цилиндро-поршневой группы указывают на различные причины их происхождения (см. рисунок 7). В числе прочих факторов, влияющих на изнашивание деталей цилиндро-поршневой группы, следует отметить несоблюдение правил пуска двигателя при низких температурах окружающего воздуха. Как правило, при резких перепадах температур дизельные двигатели тяжело запускаются. В рассматриваемом случае эксплуатанты прибегали к применению

легковоспламеняющихся пусковых жидкостей, нарушая при этом как количество впрыскиваемой жидкости, так и не учитывая тип двигателя (бензиновый или дизельный), для которого они разработаны.

Применение неоригинальных деталей или использование более дешевого материала для их изготовления также влияет на физико-механические свойства цилиндро-поршневой группы. Однако при этом необходимо учитывать коэффициенты линейного сжатия при воздействии низких температур. Для проверки оригинальности материалов деталей авторы провели испытания для оценки влияния низких температур на зазоры в цилиндро-поршневой группе одного из исследуемых цилиндров (рисунок 9, таблица).



Рисунок 9 – Замеры охлажденных поршня и гильзы

Figure 9 – Measurements of the cooled piston and sleeve

Таблица
Результаты измерений деталей цилиндро-поршневой группы
после охлаждения в климатической камере

Table
Measurement results of cylinder-piston groupparts
after freezing in a climatic chamber

T, °C	Диаметр гильзы, мм		Диаметр юбки поршня, мм	Зазор, мм
+ 20	B = 170,1	90° = 170,1	169,84	0,26
	C = 170,1	90° = 170,1	169,84	0,26
	H = 170,1	90° = 170,0	169,84	0,26
- 35	B = 169,82	90° = 169,83	169,78	0,05
	C = 169,88	90° = 170,05	169,78	0,1
	H = 169,84	90° = 169,92	169,78	0,06

Анализ внутренних диаметров гильзы при температуре + 20°C свидетельствует об их соответствии нормативным величинам заданного герметического параметра, т.е. не менее 169,75 мм. При изменении температуры происходит значительное уменьшение зазора на 0,16...0,21 мм, что создает предпосылки для образования дефектов при пусках, усугубляемых применением некондиционных моторных масел. Анализируя полученные данные также следует обратить внимание на разную степень изменения диаметра гильзы в различных поясах под воздействием низких температур.

В ходе анализа различных факторов выяснилось, что основной причиной, повлиявшей на внезапный отказ дизель-генераторных установок, явилось применение масла по классификации SAE 15W40, непригодного к использованию при температуре - 42° С. Дополнительно ухудшило ситуацию применение антифриза с температурой застывания - 40° С: повысилась нагрузка на пневмостартер, снизилась частота вращения коленчатого вала двигателя. Указанные нарушения в применении несоответствующих эксплуатационных материалов при низких температурах, мероприятий по подготовке к пуску дизель-генераторных установок явились основными причинами несвоевременного запуска и появления дефектов в виде задиров цилиндрично-поршневой группы и элементов кривошипно-шатунного механизма и в итоге привели к аварийному выходу из строя двигателей внутреннего сгорания.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные исследования, помимо установления причин поломок и отказов, позволяют на раннем этапе послеремонтной наработки определить комплекс мероприятий, направленный на повышение надежности силовых установок машин, в том числе дизель-генераторных установок.

Полученные результаты динамики изменения зазоров в верхнем, среднем и нижнем поясах цилиндрично-поршневой группы, неравномерности скорости их увеличения позволяют сделать вывод о том, что в начале послеремонтного этапа эксплуатации необходимо особое внимание уделять вопросам технической диагностики по таким параметрам, как пульсация картерных газов, ускорение свободного разгона при поочередном отключении цилиндров, относительная токовая компрессия и другим. Такой подход позволит своевременно обнаружить неисправности отдельных элементов, что не всегда выявляется инте-

гральными, обобщенными диагностическими параметрами (измерением мощности, определением часового расхода топлива и другими).

По рекомендациям фирмы Caterpillar применение вязких моторных масел оправдано при круглосуточной эксплуатации оборудования, так как обеспечивает достаточную толщину масляного клина. Однако при использовании машин и оборудования в условиях низких температур окружающего воздуха масляные поддоны двигателей должны быть оснащены средствами разогрева, обеспечивающими надежный пуск и высокий уровень вероятности безотказной работы в течение дальнейшей эксплуатации [26].

Внедрение предлагаемых мероприятий повысит надежность машин, оборудования, снизит аварийность при их эксплуатации в условиях низких температур. Соблюдение правил технической эксплуатации двигателей внутреннего сгорания позволит избежать значительных издержек, связанных с устранением аварийной ситуации, простоев техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вашуркин И.Ю. Тепловая подготовка и пуск ДВС мобильных транспортных и строительных машин зимой. Санкт-Петербург, Наука, 2002. 145 с.
2. Николаев Л.А., Сташкевич А.П., Захаров И.А. Системы подогрева тракторных дизелей при пуске. Москва, Машиностроение, 1977. 191 с.
3. Wu H., Zhang L. The Optical Investigation on Initial Flame Developing Characteristics of Diesel Jet under Cold Start Conditions // Combustion Science and Technology. Jan 2020. DOI:org/10.1080/00102202.2019.1709829.
4. Milojevic S., Pesic R. Determination of Combustion Process Model Parameters in Diesel Engine with Variable Compression Ratio // Journal of Combustion. Volume 2018. Article ID 5292837. DOI:org/10.1155/2018/5292837.
5. Девянин С. Н., Марков В. А. Топливо утяжелённого состава и пуск дизеля // Автомобильная промышленность. 2003. № 5. С. 10-12.
6. Hamouda L.B., Ayadi M.A. Fuzzy fault tolerant predictive control for a diesel engine air path (Article) // International Journal of Control, Automation and Systems. Institut de Recherche en Systemes Electroniques Embarqués (IRSEEM), BP 10024, Avenue Galilee, Rouen, France. 2016. Vol. 14. Iss. 2. 1 Pp. 443-451.
7. Камалудинов В.Г., Марков В.А. Холодный пуск двигателя. Результаты исследования процессов подачи и распыливания топлива // Автомобильная промышленность. 2010. № 9. С. 9-11.
8. Shayler J., Leong D., Murphy M. Contributions to engine friction during cold, low-speed running and the dependence on oil viscosity // SAE Paper 2005-01-1654, 2005. E 2003, Fall Technical Conference.

9. Zhong L., Henein N. A Mathematical Model for the Cranking Period in the Cold Start of Diesel Engines // Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. January 2003. DOI: 10.1115/IMECE2003-43990.

10. Liu H., Henein N., Bryzik W. Simulation of Diesel Engines Cold-Start // Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. January 2003. DOI:10.4271/2003-01-0080.

11. Vivegananth M., Ramesh A. A novel method to improve the cold starting ability of a low compression ratio diesel engine through recompression of the charge // SAGE Journals. 2018. Volume 233. issue 7, pp. 1735-1749. DOI:org/10.1177/0954407018785009.

12. Ramadhas, AS, Xu, H. Improving cold start and transient performance of automotive diesel engine at low ambient temperature. SAE technical paper 2016-01-0826, 2016.

13. Shi Z., Lee C., Wu H., Li H. Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions // Applied Energy. Volume 26215. March 2020. Article 114552. doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114552.

14. Park J.K. Simulation of starting process of diesel engine under cold condition // International Journal of Automotive Technology. 2007. № 3. Vol. 8. Pp. 289-298.

15. Nagano S., Kawazoe H., Ohsava K. Effect of fuel atomization on startability of engine with flight direction control fuel injector. // JSAE Rev. 1990. 11. № 2. Pp. 77-80.

16. Mourelatos Z. P. An Efficient Journal Bearing Lubrication Analysis For Engine Crankshafts // Tribology Transactions. 2003. Vol. 44. №3. Pp. 351-358.

17. Pastor J. V., García-Oliver J. M., Pastor J. M. Ignition and combustion development for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions // Fuel. 2011. Vol. 90. Iss. 4 Pp. 1556-1566. DOI: org/10.1016/j.fuel.2011.01.008.

18. Купершмидт В.П. Средства облегчения пуска двигателей в холодных условиях // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. № 1. С. 30-32.

19. Карташевич А.Н., Кухаренок Г.М., Горденко А.В., Разинкевич Д.С. Улучшение пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации. Минск, 2005. 180 с.

20. Денисов А.С., Данилов И.К. Влияние условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя // Вестник СГТУ. 2005. № 4 (9). С. 57-60.

21. Патрахальцев Н.Н., Сеницын А.К., Бадеев А.А. Возможности форсирования дизеля изменением физико-химических свойств топлива // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 33-35.

22. Неговора А. В. Совершенствование системы предпусковой подготовки автотракторных дизелей в условиях низких температур // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 5. С. 49-50.

23. Гальянов И. В. Новый способ запуска двигателя в холодное время года // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 11. 10 с.

24. Денисов А. С. Обеспечение надежности автотракторных двигателей. Саратов: СГТУ. 2007. 422 с.

25. Патрахальцев Н.Н., Фомин А.В., Валеев Д.Х. Повышение эффективности холодного пуска дизеля // Двигателестроение. 1995. № 2. С. 79-80.

26. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Эксплуатационные жидкости для машин Caterpillar. 2010. 178 с.

REFERENCES

1. Vashurkin I.YU. *Teplovaya podgotovka i pusk DVS mobil'nyh transportnyh i stroitel'nyh mashin zimoj: monografiya* [Thermal preparation and start-up of ICE of mobile transport and construction vehicles in winter: monograph.] SPb, Nauka, 2002: 145 p. (in Russian)

2. Nikolaev L.A., Stashkevich A.P., Zaharov I.A. *Sistemy podogreva traktornyh dizelej pri puske: monografiya* [Heating systems for tractor diesel engines at start-up: monograph.] Moscow, Mashinostroenie, 1977. 191 p. (in Russian)

3. Wu H., Zhang L. The Optical Investigation on Initial Flame Developing Characteristics of Diesel Jet under Cold Start Conditions. *Combustion Science and Technology*. 2020. DOI: org/10.1080/00102202.2019.1709829.

4. Milojevic S., Pesic R. Determination of Combustion Process Model Parameters in Diesel Engine with Variable Compression Ratio // *Journal of Combustion*. 2018. Article ID 5292837. DOI: org/10.1155/2018/5292837.

5. Devyanin S. N., Markov V. A. *Toplivo utyazhlyonnogo sostava i pusk dizelya* [Weighted fuel and diesel start] *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2003. № 5. Pp. 10-12. (in Russian)

6. Hamouda L.B., Ayadi M.A. Fuzzy fault tolerant predictive control for a diesel engine air path (Article). *International Journal of Control, Automation and Systems*. Institut de Recherche en Systemes Electroniques Embarqués (IRSEEM), BP 10024, Avenue Galilee, Rouen, France. 2016; 14 (2.1): 443-451.

7. Kamaltdinov V.G., Markov V.A. *Kholodnyj pusk dvigatelya. Rezul'taty issledovaniya protsessov podachi i raspylivaniya topliva* [Cold start of the engine. Results of the investigation of fuel supply and spraying processes]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2010; 9: 9-11. (in Russian)

8. Shayler J., Leong D., Murphy M. Contributions to engine friction during cold, low-speed running and the dependence on oil viscosity. *SAE Paper 2005-01-1654, 2005. E 2003, Fall Technical Conference*.

9. Zhong L., Henein N. A Mathematical Model for the Cranking Period in the Cold Start of Diesel Engines. *Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2003. DOI: 10.1115/IMECE2003-43990.

10. Liu H., Henein N., Bryzik W. Simulation of Diesel Engines Cold-Start // Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. January 2003. DOI: 10.4271/2003-01-0080.

11. Vivegananth M., Ramesh A. A novel method to improve the cold starting ability of a low compression ratio diesel engine through recompression of the charge // SAGE Journals. 2018. Volume 233. issue 7, pp. 1735-1749. DOI: org/10.1177/0954407018785009.

12. Ramadhas, AS, Xu, H. Improving cold start and transient performance of automotive diesel engine at low ambient temperature. SAE technical paper 2016-01-0826, 2016.

13. Shi Z., Lee C., Wu H., Li H. Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions. *Applied Energy*. Vol. 26215. 2020. Article 114552. DOI: org/10.1016/j.apenergy.2020.114552.

14. Park J.K. Simulation of starting process of diesel engine under cold condition. *International Journal of Automotive Technology*. 2007; № 3 (8): 289-298.

15. Nagano S., Kawazoe H., Ohsava K. Effect of fuel atomization on startability of engine with flight direction control fuel injector. *JSAE Rev.* 1990; 11(2): 77-80.

16. Mourelatos Z. P. An Efficient Journal Bearing Lubrication Analysis For Engine Crankshafts. *Tribology Transactions*. 2003; 44(3): 351-358.

17. Pastor J. V., García-Oliver J. M., Pastor J. M. Ignition and combustion development for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions. *Fuel*. 2011; 90(4): 1556-1566. DOI:org/10.1016/j.fuel.2011.01.008.

18. Kupersmidt V.L. *Sredstva oblegcheniya puska dvigatelej v holodnyh usloviyah* [Means of facilitating engine starting in cold conditions] *Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny*. 2001. 1. 30-32. (in Russian).

19. Kartashevich A.N., Kuharenok G.M., Gordeenko A.V., Razinkevich D.S. *Uluchshenie puskovykh kachestv avtotraktornykh dizelej v zimnij period ekspluatatsii: monografiya* [Improving the starting qualities of automotive diesel engines in the winter period of operation: a monograph.]. Minsk, 2005. 180 p. (in Russian).

20. Denisov A.S., Danilov I.K. Vliyanie uslovij smazki na tolshчину maslyanogo sloya v shatunnyh podshchipnikah dizel'nogo dvigatelya [Influence of lubrication conditions on the thickness of the oil layer in the connecting rod bearings of a diesel engine] *Vestnik SGTU (Nadezhnost' mashin)*. 2005; 4(9): 57-60. (in Russian).

21. Patrahal'cev N.N., Sinicyn A.K., Badeev A.A. Vozmozhnosti siroirovaniya dizelya izmeneniem fiziko-himicheskikh svoystv topliva [Possibilities of boosting a diesel engine by changing the physicochemical properties of fuel] *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 33-35. (in Russian).

22. Negovora A. V. Sovershenstvovanie sistemy predpuskovoj podgotovki avtotraktornykh dizelej v usloviyah nizkikh temperatur [Improvement of the pre-start preparation system for automotive diesel engines at low temperatures] *Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny*. 2008; 5: 49-50. (in Russian).

23. Gal'yanov I. V. Novyj sposob zapuska dvigatelya v holodnoe vremya goda [A new way to start the engine in the cold season]. *Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny*. 2007. 11. 10. (in Russian)

24. Denisov A. S. Obespechenie nadezhnosti avtotraktornykh dvigatelej [Ensuring the reliability of automotive engines: monograph.] Saratov, SGTU, 2007. 422 p. (in Russian).

25. Patrahal'cev N.N., Fomin A.V., Valeev D.H. Povyshenie effektivnosti holodnogo puska dizelya [Improving the efficiency of cold start of a diesel engine] *Dvigatelsestroenie*. 1995; 2: 79-80. (in Russian).

26. Manual for operation and maintenance. Operational fluids for Caterpillar machines. Recommendations. 2010.178 p.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Салихов Р.Ф. Формулировка направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (40%).

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований (30%).

Дубков В.В. Обзор результатов предыдущих исследователей. Формулировка результатов и выводов (30%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Rinat F. Salikhov. Study area and topics statement. Topic development manual. Methodology and research methods selection (40%).

Victoria N. Kuznetsova. Research issues statement. Research problem statement. Analytical research algorithm statement (30%).

Valerii V. Dubkov. A Previous researches review. Results and conclusions statement (30%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ринат Фокилевич Салихов – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: salikhorinat@yandex.ru).

Виктория Николаевна Кузнецова – д-р техн. наук, проф., Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в

строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Валерий Витальевич Дубков – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dubkovvv.74@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rinat F. Salikhov – Cand. of Sci., Associate Professor, Maintenance and operation of transport and technological machines and complexes in construction Department, Federal State Budgetary Educational

Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira ave. 5. e-mail: salikhorinat@yandex.ru).

Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Scopus Author ID 8671569200, Maintenance and operation of transport and technological machines and complexes in construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Valerii V. Dubkov – Cand. of Sci., Associate Professor, Maintenance and operation of transport and technological machines and complexes in construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira ave. 5. e-mail: dubkovvv.74@mail.ru).

УДК 625.76.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573>

ОБЗОР РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАВЕСНЫХ ЭКСКАВАТОРНЫХ ВИБРОПЛИТ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВ

И.С. Тюремнов, Д.В. Федорова
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия,

АННОТАЦИЯ

Введение. Навесные экскаваторные виброплиты (НВП), являющиеся сменным рабочим оборудованием экскаваторов, применяются для уплотнения грунтов обратных засыпок траншей, колодцев, пазух фундаментов и в других «узких» местах строительства, а также при уплотнении грунтов на наклонных поверхностях откосов насыпей и выемок.

При практическом использовании НВП строители сталкиваются с необходимостью решения двух задач: обоснования выбора модели НВП для уплотнения грунта в заданных условиях, определяемых видом грунта, влажностью грунта, толщиной слоя и требуемым коэффициентом уплотнения.

Определения длительности уплотнения НВП грунта при позиционном уплотнении в одной точке для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения грунта заданного вида в слое требуемой толщины. Вышеприведенные задачи требуют наличия информации о технологических возможностях НВП при уплотнении грунтов в различных технологических ситуациях, причем оценка технологических возможностей НВП должна учитывать и осуществляющийся в настоящее время в РФ переход на новую нормативную базу в области показателей оценки результатов уплотнения грунтов в строительстве.

Материалы и методы. Обзор технологических возможностей НВП проводился на основе информации, предоставляемой на официальных сайтах основных отечественных и зарубежных производителей и поставщиков НВП.

Выводы. Анализ информации, предоставляемой производителями и поставщиками НВП, показал, что большинство предоставляемой информации относится к техническим характеристикам НВП и экскаваторов. Информация о технологических возможностях НВП практически отсутствует. Также при оценке технологических возможностей НВП производители и поставщики используют термины (например, «объем трамбования»), не имеющие однозначной трактовки.

Практическое значение. Отсутствие информации о технологических возможностях НВП при уплотнении грунтов в различных технологических ситуациях приводит к ошибкам при выборе модели НВП и назначении продолжительности работы при позиционном уплотнении грунта в одной точке, вследствие чего повышаются риски недоуплотнения грунтов и снижения срока службы возводимых объектов. Для решения данной проблемы на кафедре «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ разрабатывается методика расчета результатов уплотнения грунта НВП при работе в различных технологических ситуациях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, виброплита, виброплита навесная экскаваторная, глубина уплотнения, коэффициент уплотнения, вид грунта, режим работы, возможности технологические.

Поступила 25.08.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: Тюремнов И.С., Федорова Д.В. Обзор рекомендаций производителей по оценке технологических возможностей навесных экскаваторных виброплит при уплотнении грунтов. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573>

© Тюремнов И.С., Федорова Д.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

REVIEW OF MANUFACTURERS' RECOMMENDATIONS ON TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF EJECTABLE EXCAVATOR VIBROPLATES ASSESSMENT DURING SOIL COMPACTION

I.S. Tiuremnov, D.V. Fedorova
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. Add-on compactors for excavators (ACE hereinafter) are replaceable working equipment for excavators. They are used for soil compaction after the backfill of trenches, wells, foundation cavities and other "narrow spaces" of construction, as well as soil compaction at slopes of embankments and excavations.

In practical use of ACE, builders face two challenges:

to justify the choice of an ACE for soil compaction under given conditions determined by the soil type and moisture, layer thickness, and the required compaction factor; to determine the time required to compact soil with an ACE at a single point positional compaction to ensure the required compaction factor of a given type of soil in a layer of required thickness.

The problems above require the information regarding technological capabilities of ACEs in different technological situations of soil compaction. The assessment of such technological capabilities of ACEs, at the same time, should take into account the ongoing transition to a new regulatory framework in Russia in the field of assessment indicators for the results of soil compaction in construction.

Materials and methods. ACE technological capabilities review was conducted based on the information provided on the official websites of the largest Russian and foreign ACE manufacturers and suppliers.

Conclusion. The analysis of information provided by ACE manufacturers and suppliers showed that most of that information is technical specifications of ACEs and excavators. There is almost no information on technological capabilities of ACEs. At the same time, ACE manufacturers and suppliers use ambiguous terminology (for example, "compaction volume") in the assessment of technological capabilities.

Practical value. Lack of information on technological capabilities of ACEs in various technological situations of soil compaction leads to errors in selection of an ACE model and its operation time during single point positional soil compaction, which increases the risk of under compaction and reduced service life of constructed objects. To solve this problem, the Construction and Road-Building Machinery Department of Yaroslavl State Technical University is developing a methodology for calculating the results of soil compaction with an ACE in different technological situations.

KEY WORDS: soil, compaction, vibration, vibrating plate, vibrating plate compactor, statistical analysis, determination coefficient, driving force, operating weight, vibration frequency, base size, excavator weight.

Submitted 25.08.20, revised 23.10.2020.

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., Fedorova D.V. Review of manufacturers' recommendations on technological capabilities of ejectable excavator vibroplates assessment during soil compaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573>

© Tiuremnov I.S., Fedorova D.V.



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

ВВЕДЕНИЕ

Навесные экскаваторные виброплиты (НВП) применяются для уплотнения грунтов обратных засыпок траншей, колодцев, в пазухах фундаментов и других «узких» местах, а также при уплотнении откосов насыпей и выемок [1]. Данное оборудование является сменным рабочим оборудованием экскаваторов и устанавливается на рукоять вместо экскаваторного ковша. В отличие от самоходных виброплит и вибрационных катков НВП чаще всего работают позиционно и обеспечивают уплотнение грунта от рыхлого до плотного состояния за одну установку. При этом на НВП через стрелу и рукоять может передаваться часть веса экскаватора, что увеличивает статическое давление НВП на грунт и эффективность уплотнения. Возможность установки НВП на экскаваторы различной массы, использование НВП на различном вылете и участие машиниста экскаватора в регулировании усилия прижима НВП стрелой экскаватора усложняет оценку усилия, передаваемого на НВП от экскаватора.

При оценке технологических возможностей НВП наибольшее практическое значение имеют две задачи:

1. Обоснование выбора модели НВП для работы в заданных условиях, определяемых видом грунта, влажностью грунта, толщиной слоя и требуемым коэффициентом уплотнения.
2. Обоснование режима работы НВП, определяемого длительностью воздействия на грунт в одной точке для обеспечения заданного коэффициента уплотнения грунта известного вида и влажности в слое заданной толщины.

Дополнительную трудность при решении вышеперечисленных задач вызывает осуществляемый в настоящее время в РФ переход на новую нормативную базу. Если раньше результат уплотнения грунта оценивался коэффициентом уплотнения в соответствии с СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*», ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» и ГОСТ 22733–2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности», то в новых нормативных документах (ПНСТ 311–2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения») результат уплотнения грунта и каменных материалов оценивается статическим и динамическим модулем деформации. С одной стороны, это позитивное и давно ожидаемое решение, поскольку использование показателя «коэффициент уплотнения» для оценки качества уплотнения грунта сопряжено с множеством недостатков, а для каменных материалов вообще не применимо [2-7]. С другой стороны, в РФ имеется [5, 8] лишь ограниченный объем исследований по оценке корреляции значений статического и, особенно, динамического модуля деформации грунтов различных видов и влажностей как между собой, так и со значением коэффициента уплотнения [9-11], что не позволяет использовать результаты проводимых ранее исследований применительно к новой нормативной базе. В дальнейшем в данной статье результат уплотнения грунта будет оцениваться коэффициентом уплотнения, поскольку это более привычный показатель. При этом имеется в виду, что должна существовать корреляционная связь между значением коэффициента уплотнения и значениями статического и динамического модуля деформации грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа использовались данные о характеристиках НВП основных отечественных и зарубежных производителей, предоставляемые на официальных сайтах компаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ведущий российский поставщик сменного рабочего оборудования для спецтехники компания «Традиция-К» предоставляет информацию о характеристиках поставляемых НВП, приведенную в таблице 1^{1, 2}. Большинство предоставляемой информации относится к техническим характе-

¹ Виброплиты Традиция-К [Электронный ресурс] // Традиция-К [Официальный сайт]. – URL: <https://www.tradicia-k.ru/product/vibrotrambovka-delta-cr-30/> (дата обращения: 23.09.2019).

² Виброплиты Традиция-К. Вибротрамбовки. Применение, принцип работы, выбор [Электронный ресурс] // Традиция-К [Официальный сайт]. – URL: <https://www.tradicia-k.ru/articles/vibrotrambovki-primenenie-princip-raboty-vybor/>.

Таблица 1
Характеристики НВП Delta ^{1,2}

Table 1
Characteristics of VPC Delta

Модель	Масса, кг	Масса экскаватора, т	Размер плиты, мм	Центробежная сила, кН	Частота, Гц	Объем трамбования, м ³	Расход, л/мин	Давление, атм	Амплитуда колебаний, мм	Статический момент, кг*м
Delta CP25	225	2-8	730x390	24	40	н/д	30/50	170/200	н/д	н/д
Delta CP30	360	7-12	600x990	19-29	40	0,2	70/100	90-130	1,3	0,14
Delta CP35	360	7-14	600x920	50	36,6	н/д	65/90	80-260	н/д	
Delta CP80	800	10-16	750x1183	68,6-78,5	36,6	0,8	140/190	120/160	3,8	0,82
Delta CP85	800	15-20	750x1120	78	36,6	н/д	99/125	115-200	н/д	н/д
Delta CP100	1050	14-25	950x1338	88,3-107,9	33,3	1,0	160/230	130/170	4,4	1,3
Delta CP105	1050	19-25	950x1270	127	33,6	н/д	120/150	115-230	н/д	н/д
Delta CP120	1300	18-35	1000x1373	98,1-147,1	33,3	1,2	170/240	150/190	5,2	1,8
Delta CP150	1800	30-40	1000x1577	147,1-196,1	36,6	1,7	260/280	250/300	н/д	н/д

н/д – нет данных.

ристикам моделей НВП и базовой машины (экскаватора). К технологическим характеристиками относится только «объем трамбования».

Для выбора модели плиты компания «Традиция-К» приводит значения «удельного импульса силы» или «импульса напряжения», наиболее эффективные для уплотнения насыпных грунтов до коэффициента уплотнения 0,95². Однако в характеристиках представляемых моделей НВП не приводятся соответствующие значения «удельного импульса силы» или «импульса напряжения», что не позволяет использовать предоставляемые рекомендации в практических целях. При этом, в соответствии с СП 34.13330.2012, коэффициент уплотнения 0,95 недостаточен для грунтов рабочего слоя земляного полотна. А рекомендации для других значений коэффициента уплотнения не приводятся.

Следует также отметить, что термин «удельный импульс силы» по размерности и смыслу соответствует термину «удельный импульс удара», предложенному проф. Н.Я. Хархутой для описания процессов ударного уплотнения грунтов и определяемого по формуле [12]:

$$i = \frac{mV}{F}, \quad (4)$$

где m – масса рабочего органа, кг; V – скорость удара, м/с; F – площадь основания рабочего органа, м².

Из зависимости (1) следует, что для определения значения удельного импульса удара необходимо определение значений массы рабочего органа и его скорости в момент касания грунта. Поскольку вынуждающее усилие вибровозбудителя НВП примерно в 10 раз превышает вес НВП [13], а уплотняющая плита с закрепленным на ней вибровозбудителем крепится к верхней части НВП через амортизаторы, то в процессе колебаний возможен периодический отрыв уплотняющей плиты НВП от грунта и реализация различных режимов колебаний, аналогичных режимам колебаний вибрационных катков «постоянный контакт», «частичный отрыв», «двойной прыжок» и других [14-15]. Это приводит к существенным трудностям определения скорости НВП в момент касания грунта, поскольку высота отскока, время движения в отрыве от грунта и скорость удара будут зависеть от частоты и вынуждающей силы вибровозбудителя; количества, характеристик и способа установки амортизаторов; свойств грунта и дополнительного прижима со стороны экскаватора. При этом по мере уплотнения грунта от рыхлого состояния до плотного в результате изменения упругих характеристик грунта возможно изменение режима колебаний НВП, а следовательно, и скорости в момент касания грунта, что будет приводить к изменению значения удельного импульса удара.

Также возникают трудности с определением значения массы рабочего органа m в процессе колебаний. Для многих грунтоуплотняющих вибрационных машин, в том числе и для НВП, динамическая составляющая передаваемого на грунт усилия существенно превышает статический вес элементов оборудования. Результирующая сила, передаваемая на грунт, как и скорость удара, будет зависеть от характеристик НВП (масс нижней и верхней частей НВП; частоты и вынуждающего усилия колебаний; количества, характеристик и способа установки амортизаторов), свойств грунта и пригрузки со стороны экскаватора.

Таким образом, аналитическое определение численного значения удельного импульса удара связано с серьезными трудностями, в т. ч. обусловленными постоянно изменяющимися в процессе уплотнения свойствами грунта. С учетом вышесказанного, а также того, что в характеристиках представляемых моделей НВП не приводятся соответствующие значения «удельного импульса силы» или «импульса напряжения», приведенные «Традиция-К» рекомендации не могут быть использованы для практических целей – выбора модели НВП для выполнения работ в конкретных условиях.

В рекомендациях компании «Традиция-К» по выбору НВП² отмечается, что глубина уплотнения может быть определена в результате деления «объема трамбования» на площадь опорной поверхности плиты. Однако объем уплотняемого в массиве грунта может иметь разную форму. Исследователи предлагают описывать форму уплотняемого грунта различными фигурами: усеченная пирамида [16], гиперболоид [17], «луковица» [18-19], усеченная призма [20], полусфера и др. В рекомендациях «Традиция-К» не указывается о предполагаемой форме, занимаемой уплотненным грунтом, что может приводить к существенному разбросу результирующих значений глубины уплотнения грунта при использовании различных моделей НВП. Также известно [12, 21], что при уплотнении вибрационными и ударными нагрузками плотность грунта распределяется по толщине слоя неравномерно, уменьшаясь по глубине, поэтому наибольшие трудности возникают при уплотнении грунта на нижней границе слоя. Причем трудности уплотнения грунтов слоями большой толщины возрастают с увеличением связности грунтов, определяемой содержанием глинистых частиц в грунте [12].

С другой стороны, требуемое число проходов самоходной машины или время воздействия машины, работающей позиционно (как НВП), нелинейно возрастает с увеличением коэффициента уплотнения грунта [12]. Поэтому время воздействия НВП должно зависеть от вида грунта, толщины слоя и требуемого коэффициента уплотнения. Однако в рекомендациях «Традиция-К» сведения о требуемом времени воздействия представляемых моделей виброплит при уплотнении различных видов грунта с учетом обеспечения заданного коэффициента уплотнения не приводятся, что не позволяет строителям принимать обоснованные решения по назначению режима работы НВП, определяемом продолжительностью её работы.

Российская компания Технопарк «Импульс» производит серию НВП, применяемых для уплотнения песка средней крупности, гравия и асфальта. Указывается, что производимые НВП могут применяться для обустройства различных строительных площадок, траншей различного назначения (под коммуникации, фундаменты и т.д.), при планировочных работах, для проведения различных дорожных и ремонтно-строительных работ. Основные технические характеристики НВП Impulse приведены в таблице 2^{1, 2, 3}. Большинство предоставляемой информации (см. таблицу 2) относится к техническим характеристикам НВП. Технологические возможности представлены лишь параметром «объем трамбования». Однако данный параметр не имеет однозначного определения и допускает различные оценочные значения глубины уплотнения, о чем было сказано выше. Также следует отметить, что термин «трамбование» не соответствует режиму работы НВП, поскольку при трамбовании интервал времени между отдельными воздействиями существенно превышает продолжительность одного воздействия. Режим работы НВП более корректно назвать виброударным, поскольку частота воздействий превышает 1 Гц и при каждом воздействии рабочий орган может отрываться от грунта. Таким образом, компания «Импульс» также не предоставляет рекомендаций по оценке технологических возможностей НВП с учетом вида грунта и требуемого коэффициента уплотнения, что не позволяет обоснованно решать задачи выбора модели НВП для выполнения работ в заданных условиях и назначать режимы уплотнения.

³ Вибротрамбовка на экскаватор [Электронный ресурс] // Импульс [Официальный сайт]. – URL: <https://www.impulse.su/katalog/stroytelstvo/vibrotrambovki-na-ekskaatory>.

Таблица 2
Характеристики НВП Impulse (Россия)^{1,2,3}

Table 2
Characteristics of VPC Impulse

Модель	Вы- нужда- ющее уси- лие, кН	Ча- сто- та вибра- ции, Гц	Размеры плиты, мм	Давле- ние, атм	Расход, л/ мин	Масса, кг	Объем Трам- бова- ния, м ³	Масса экскава- тора, т	Ам- пли- туда коле- баний, мм	Стати- ческий мо- мент, кг*м
V30	26	40	850x600	90-130	70-100	360	0,2	2-8	1,3	0,14
V60	53	38,3	850x700	100-140	80-110	550	0,6	6-14	н/д	н/д
V80	71	36,6	1100x750	120-160	140-190	800	0,8	10-16	н/д	н/д
V100	89	33,3	1250x950	130-170	160-230	1050	1	14-25	4,5	1,3
V120	98	33,3	1300x1000	150-190	170-240	1300	1,2	18-35	н/д	н/д
н/д – нет данных										

Один из ведущих мировых производителей оборудования для уплотнения дорожно-строительных материалов компания AMMANN предлагает широкую линейку НВП серии АРА с массой от 160 до 1170 кг (таблица 3⁴). Для определения области применения НВП, компания AMMANN предоставляет рекомендации (таблица 4⁵). Данные рекомендации позволяют получить некоторое представление о технологических возможностях НВП от компании AMMANN, однако в них приводятся значения толщины уплотняемого слоя из различных материалов без указания достигаемого коэффициента уплотнения и требуемой продолжительности уплотнения для обеспечения требуемой плотности, что существенно снижает возможность применения данных рекомендаций для решения практических задач. Также из

рекомендаций AMMANN (см. таблицу 4) неясно, как будет изменяться продолжительность уплотнения и достигаемая плотность при уплотнении материалов толщинами слоев, отличающихся от приведенных в таблице 4.

Компания AtlasCopco производит НВП серии НС массой от 160 до 1135 кг. Технические характеристики НВП фирмы AtlasCopco приведены в таблице 5⁶. Компанией AtlasCopco приводятся только технические характеристики НВП и отсутствует информация о технологических возможностях данного оборудования (глубине уплотнения различных видов грунта и достигаемом коэффициенте уплотнения грунта), что не позволяет обоснованно выбирать модель НВП AtlasCopco для производства работ в конкретных условиях и назначать режимы работы оборудования.

⁴ AMMANN: Machines. APA series. [Электронный ресурс] Дата обновления: 20.03.2020. – URL: https://1n000s1caj2j2lxh39vxh8l5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/apa_add-on_compactors_brochure_mpb-1581-01-en-1.pdf

⁵ AMMANN: Light compaction. [Электронный ресурс] Дата обновления: 20.03.2020. URL: https://1n000s1caj2j2lxh39vxh8l5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/light_compaction_brochure_mpb-1577-07-en_200129.pdf.

⁶ AtlasCopco [Электронный ресурс]. Дата обновления: 20.02.2020. – URL: <http://atlas-co.ru/catalog/uplotniteli-kompaktory.html>.

Таблица 3
Технические характеристики НВП АММАН⁴

Table 3
Technical characteristics of VPC AMMANN

Модель вибро-плиты	Масса, кг	Масса экскаватора, т	Вынуждающее усилие, кН	Частота вибрации, Гц	Расход, л/мин	Размеры плиты, мм	Рабочее давление, бар	Обратное давление, бар
APA 20/30	160	5	20	60	40-60	300x875	100	30
APA 20/40	170	5	20	60	40-60	400x875	100	30
APA 55/46	370	12	55	45	50-80	460x1142	150	30
APA 55/56	385	12	55	45	50-80	560x1142	150	30
APA 55/64	370	12	55	60	70-110	640x1142	150	30
APA 72/74	950	10-20	72	36	90	740x1142	150	30
APA 75/74	950	12/25	82	36	150	740x1142	250	10
APA 75/74 2M	950	12/25	75/40	36/55	150	740x1142	250	10
APA 100/88	1170	18/40	110	36	150	880x1295	250	10
APA 100/88 2M	1170	18/40	100/55	36/55	150	880x1295	250	10

Таблица 4
Рекомендации по применению НВП АММАН⁵

Table 4
Recommendations for use VPS AMMANN

Модель НВП	Применимость *				Толщина слоя, см			
	Утолщенные тротуарные блоки (толще 10 см)	Небольшие тротуарные блоки (тоньше 10 см)	Асфальт (с системой разбрызгивания воды)	Каменные материалы	Песок/гравий	Смешанный грунт	Связный грунт	Растительный грунт
APA 20/30	0	0	-	0	35	30	40	40
APA 20/40	0	0	-	0	30	25	35	35
APA 55/46	0	0	-	0	55	60	65	60
APA 55/56	0	0	-	0	50	55	60	55
APA 55/64	0	0	-	0	45	50	55	50
APA 72/74	0	-	-	0	60	55	55	55
APA 75/74	0	-	-	0	50	65	65	65
APA 75/74 2M	0	-	-	0	60	65	65	65
APA 100/88	0	-	-	0	80	90	100	90
APA 100/88 2M	0	-	-	0	85	90	100	90

* Примечание. «-» – не подходит; «0» – подходит с ограничениями; «+» – подходит.

Компания Indeco (Италия) производит две линии НВП: ИНС и ИНС R, отличающихся наличием ротатора (буква «R» в названии НВП). В характеристиках выпускаемых НВП, приведенных в таблице 6⁷, компания Indeco приводит только технические сведения, без указания технологических возможностей НВП, что

не позволяет осуществить выбор модели НВП для уплотнения грунта заданного вида слоем требуемой толщины до обеспечения заданного проектом коэффициента уплотнения, а также не позволяет обосновать время уплотнения для работы в конкретных условиях производства работ.

⁷ Indeco Compactors. IHC and IHC R Series [Электронный ресурс]. Дата обновления: 20.02.2020. URL: <https://www.indeco.it/en/products/1080/compactors.php>.

Таблица 5
Технические характеристики НВП AtlasCopco⁶

Table 5
Technical characteristics of VPC AtlasCopco

Модель	HC 150	HC 350	HC 450	HC 850	HC 1050	HC 1055
Масса НВП, кг	160	320	430	880	1130	1135
Масса экскаватора, т	1-3	3-8	4-9	9-20	20-40	20-40
Вынуждающее усилие, кН	13,7	22,5	35	71,6	103	114
Частота вибрации, Гц	35	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6
Размеры плиты, мм	721x295	929x610	929x610	1272x710	1364x864	1364x864
Давление, бар	150	150	150	150	150	150
Расход, л/мин	30	57	76	114	151	189

Таблица 6
Технические характеристики НВП Indeco⁷

Table 6
Technical characteristics of VPC Indeco

Модель виброплиты	Масса, кг	Масса экскаватора, т	Вынуждающее усилие, кН	Частота вибрации, Гц	Размеры основания, мм	Высота, мм	Расход, л/мин	Рабочее давление, бар	Уплотняющее воздействие, Н/см ²
INC 50	200	8-12	29,5	33-50	760x300	560	45-70	240	16,7
INC 70	450	3,5-13	39	33,3	865x460	600	75	200	10,8
INC 75	410	4-14	39	33,3	865x635	600	76	200	10,8
INC 150	799	8-22	98	33,3	1194x710	790	121	200	17,7
INC 250	996	15-45	167	30/37	1220x890	800	189	170	21,6
INC R 50	425	3,5-13	29,5	33/50	305x760	880	45/70	240	16,7
INC R 70	630	6,5-16	39	33	460x840	930	75	200	10,8
INC R 75	670	7-16	39	33	640x870	930	75	200	10,8
INC R 150	1185	15-25	98	33	710x1200	1080	120	200	17,7

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ характеристик и рекомендаций по применению НВП основных отечественных и зарубежных производителей показывает, что производители не предоставляют информацию для решения основных практически важных задач: обоснования выбора модели НВП для работы в различных технологических условиях и обоснования режима работы НВП для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения заданного вида грунта в слое требуемой толщины.

Данная проблема характерна не только для группы достаточно специфического и не очень широко распространенного грунтоуплотняющего оборудования, к которому относятся НВП. Аналогичная ситуация (с весьма ограниченными рекомендациями по обоснованию

выбора модели и назначению режимов работы в различных условиях производства работ) характерна и для наиболее распространенных видов машин для уплотнения грунтов – вибрационных катков и самоходных вибрационных плит [22-23]. Представляется, что причина этого заключается в следующих факторах:

- разнообразии грунтовых и технологических условий производства работ;
- недостаточности данных о механических характеристиках грунтов различного вида и коэффициента уплотнения при воздействии статических, вибрационных и ударных нагрузок;
- сложности и недостаточной исследованности процессов, происходящих в грунте при виброударном нагружении его поверхности;

– сложности исследования колебательных процессов в системе «грунт-рабочий орган-рама» с учетом изменяющихся в процессе уплотнения свойств грунта.

Вышеперечисленные факторы сдерживают разработку методики расчета влияния характеристик НВП на результаты уплотнения грунта в конкретных условиях производства работ.

Однако накопленный на кафедре «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ опыт исследования процессов уплотнения грунтов трамбуемыми машинами [24], вибрационными катками [25-26] и самоходными вибрационными плитами [27] позволяет рассчитывать на возможность разработки методики расчета результатов уплотнения грунта для НВП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко И.Н., Мирзоев В.В., Михайлов Р.В., Марковчин С.Г., Салаяев С.И. Применение навесного оборудования для уплотнения грунтов и искусственных насыпей транспортных магистралей // Механизация строительства. 2012. № 8 (818). С. 2-10.
2. Тюремнов И. С., Игнатъев А.А. Нужен единый подход в совершенствовании критериев уплотнения дорожно-строительных материалов // Автомобильные дороги, 2010, №5 (942). С. 67-69.
3. Костельов М.П., Пахаренко Д.В. Инновации для высокого качества дорожных работ и объектов ЗАО «ВАД» // Дорожная техника, 2009, с. 36-52.
4. Костельов М.П., Пахаренко Д.В. Опыт фирмы ВАД по устройству плотных, прочных и жестких щебеночных дорожных оснований // Дорожная техника, 2006, с. 12-23.
5. Сазонова С.А., Румянцев С.Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13
6. Труфанов А.Н., Ростовцев А.В. К вопросу развития нормативной базы лабораторных испытаний грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 79-84. URL: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2016&v=10&p=00&r=11>.
7. Козлов А.В. Проблемы интерпретации результатов штамповых испытаний при контроле качества уплотнения грунтов земляного полотна и оснований дорожных одежд // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения. Материалы Общероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 92-101.
8. Горячев М.Г. К вопросу о заимствовании норм ФРГ на минимальный модуль деформации рабочей части земляного полотна для расчёта дорожных одежд в России // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 1 (23). С. 3.
9. Махмутов М.М., Сахапов Р.Л. О качестве уплотнения грунтов земляного полотна // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 289-294. URL: https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhernala/arkhiv-zhurnal?od=sod2_2015&idizv=500.
10. Стригун К.Ю. Применение установок динамического нагружения для контроля степени уплотнения грунтов // Наука XXI века: опыт прошлого – взгляд в будущее. материалы II Международной научно-практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации. 2016. С. 257-261.
11. Стригун К.Ю. Применение установок динамического нагружения для контроля степени уплотнения грунтов // Вестник магистратуры. 2016. № 5-2 (56). С. 88-90.
12. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва, Транспорт, 1975, 288 с.
13. Тюремнов И.С., Федорова Д.В. Статистический анализ технических характеристик навесных экскаваторных виброплит // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(2). Стр. 122-133. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-122-133>.
14. Adam, D. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) / Adam D., Kopf F. // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. 2004. Pp. 97-106.
15. И. С. Тюремнов. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» // Вестник ТОГУ. 2016. № 2(41). С. 115-122. URL: <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>.
16. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Алгоритм определения параметров вибрационных катков, учитывающая массу уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации // Избранные доклады II Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ–2015)» 2016. С. 327-332.
17. Белостоцкий Б.А. К расчету оптимальных параметров трамбуемых машин. Ленинградское правление НТО Стройиндустрии СССР, 1959. С.3-11.
18. Костельов М.П. «Умные виброкатки» для дорожников (обзор с оценкой новинок последнего времени) // Каталог-справочник «Дорожная техника – 2006». 2006. С. 30-62.
19. Черныш А.С. Уплотнение грунтов с одновременным вытрамбовыванием котлованов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 112-119.
20. Савельев С.В., Бурый Г.Г., Аднагулова З.Р. Методика обоснования параметров вибрационных

катков для уплотнения грунтовых насыпей, учитывающая зону активного действия вибрации // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 54-60.

21. Костельов М.П. Влияние импульсного воздействия на пластические деформации связного грунта под жестким штампом // Динамика оснований и фундаментов. Труды 2-й конференции. Москва, 1969. Т. 2. С. 65-70.

22. Тюремнов И.С., Филатов И.С., Игнатьев А.А. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта // Вестник ТОГУ. 2014. № 2(33). С. 155-162. URL: <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>

23. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12. С. 28-32.

24. Тюремнов И.С., Разумов С.В., Доценко А.И. Методика расчета параметров и режимов работы двухмассных рабочих органов трамбуемых машин // Известия вузов. Машиностроение, 2005. №2, С. 37-44.

25. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.

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

27. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами. Ярославль, ЯГТУ, 2018. 143 с.

REFERENCES

1. Kravchenko I.N., Mirzoev V.V., Mikhaylov R.V., Markovchin S.G., Salyaev S.I. Primenenie navesnogo oborudovaniya dlya uplotneniya gruntov i iskusstvennykh nasypey transportnykh magistralei [Application of attachments for compaction of soils and artificial embankments of transport highways]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2012; 8 (818): 2-10. (in Russian)

2. Tyuremnov I. S., Ignat'ev A.A. Edinyi' podchod v sovershenstvovanii kriterie uplotneniya dorogno-stroitel'nykh materialov [We need a unified approach to improving the criteria for compaction of road construction materials]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2010; 5 (942): 67-69. (in Russian)

3. Kostel'ov M.P., Pakhareno D.V. Innovatsii dlya vysokogo kachestva dorozhnykh rabot i ob'ektov ZAO «VAD» [Innovations for high-quality road works and facilities of JSC « VAD»]. *Dorozhnaya tekhnika*. 2009. 36-52. (in Russian)

4. Kostel'ov M.P., Pakhareno D.V. Opyt firmy VAD po ustroystvu plotnykh, prochnykh i zhestkikh shchebenochnykh dorozhnykh osnovaniy [VAD company's experience in the construction of dense, strong and rigid crushed stone road foundations].

Dorozhnaya tekhnika. 2006. 12-23. (in Russian)

5. Sazonova S.A., Rumyantsev S.D. Primenenie ekspres-metodov dlya opredeleniya kharakteristik nasypnykh gruntov [Application of Express methods for determining the characteristics of bulk soils]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2017; 8(3). 113-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13. (in Russian)

6. Trufanov A.N., Rostovtsev A.V. K voprosu razvitiya normativnoy bazy laboratornykh ispytaniy gruntov [On the development of the regulatory framework for laboratory testing of soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; 10: 79-84. URL: <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2016&v=10&p=00&r=11>. (in Russian)

7. Kozlov A.V. Problemy interpretatsii rezul'tatov shtampovykh ispytaniy pri kontrole kachestva uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna i osnovaniy dorozhnykh odezhd [Problems of interpretation of the results of stamp tests in quality control of compaction of the groundbed and road surface bases]. *Polevye i laboratornye metody issledovaniya gruntov – problemy i resheniya. Materialy Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2019. 92-101. (in Russian)

8. Goryachev M.G. K voprosu o zaimstvovani norm FRG na minimal'nyy modul' deformatsii rabochey chasti zemlyanogo polotna dlya raschiota dorozhnykh odezhd v Rossii On the issue of borrowing the German norms for the minimum modulus of deformation of the working part of the roadbed for calculating road surfaces in Russia []. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2020; 1 (23). 3 p. (in Russian)

9. Makhmutov M.M., Sakhapov R.L. O kachestve uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna [About the quality of compaction of the groundbed // Proceedings of the Kazan state University of architecture and civil engineering]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015; 2(32). 289-294. URL: https://izvestiya.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2_2015&idizv=500. (in Russian)

10. Strigun K.YU. Primenenie ustanovok dinamicheskogo nagruzheniya dlya kontrolya stepeni uplotneniya gruntov [Application of dynamic loading units for monitoring the degree of soil compaction]. *Nauka XXI veka: opyt proshlogo – vzglyad v budushchee. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii..* 2016. 257-261. (in Russian)

11. Strigun K.YU. Primenenie ustanovok dinamicheskogo nagruzheniya dlya kontrolya stepeni uplotneniya gruntov [Application of dynamic loading units for monitoring the degree of soil compaction]. *Vestnik magistratury*. 2016; 5-2 (56). 88-90. (in Russian)

12. KHarkhuta N.YA., Vasil'ev YU.M. Prochnost', ustoychivost' i uplotnenie gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Strength, stability and compaction of the soil subgrade of highways]. Moscow, Transport, 1975. 288 p. (in Russian)

13. Tyuremnov I. S., Fedorova D. V. Statisticheskiy analiz tehnikeskikh kharakteristik navesnykh

ekskaatornyh vibroplit [Statistical analysis of technical characteristics of mounted excavator vibrating plates]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(2): 122-133. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-122-133>. (in Russian)

14. Adam, D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece*. 2004. Pp. 97-106.

15. Tyuremnov I.S. Obzor system nepreryvnogo kontrolya uplotneniya grunta dlya vibratsionnykh katkov. Chast' 3 [Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibration rollers. Part 3]. *Vestnik TOGU*. 2016; 2(41): 115-122. URL: <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>. (in Russian)

16. Savel'ev S.V., Bury' G.G. Algoritm opredeleniya parametrov vibratsionnykh katkov, uchityvaya massu uplotnyaemogo grunta v zone aktivnogo dey'stviya vibratsii [Algorithm for determining the parameters of vibration rollers, taking into account the mass of compacted soil in the zone of active vibration action]. *Izbrannyye doklady II mejdunarodnoy' nauchnoy' konferentsii studentov I molodykh uchenykh "Molodej", nauka, tehnologii*. 2016. 327-332. (in Russian)

17. Belostocki' B.A. K raschetu optimal'nykh parametrov trambuyuchih mashin [To calculate the optimal parameters of ramming machines]. *Leningradskoe pravlenie NTO Stroi'industrii SSSR*, 1959. 3-11. (in Russian)

18. Kostel'ov M. P. "Umnye vibrokatki" dlya dorozhnikov (obzor s ocenoi' novinok poslednego vremeni) ["Smart refrigerators" for the road (overview of the evaluation of the innovations of recent time)]. *Katalog-spravochnik Dorognaya tehnika 2006*. 2006. 30-62. (in Russian)

19. CHernysh A.S. Uplotnenie gruntov s odnovremennym vytrambovyvaniem kotlovanov [Compaction of soil with simultaneous tamping of ditches]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2015; 5: 112-119. (in Russian)

20. Savel'ev S.V., Buryy G.G., Adnagulova Z.R. Metodika obosnovaniya parametrov vibratsionnykh katkov dlya uplotneniya gruntovykh nasypey, uchityvayushchaya zonu aktivnogo deystviya vibratsii [Method of substantiation of parameters of vibration rollers for compaction of soil embankments, taking into account the zone of active action of vibration]. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov III Natsional'noy' nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2020. 54-60. (in Russian)

21. Kostel'ov M. P. Vliyanie impul'snogo vozdei'stviya na plasticheskie deformatsii svyaznogo grunta pod jestkim shtampom [Effect of pulse action on plastic deformations of cohesive soil under a rigid stamp]. *Dinamika osnovani' I fundamentov. Trudy 2-y' konferentsii*. 1969; 2: 65-70. (in Russian)

22. Tyuremnov I.S., Filatov I.S., Ignat'ev A.A. Obzor rekomendatsiy proizvoditeley po ispol'zovaniyu vibratsionnykh katkov dlya uplotneniya grunta [Overview of manufacturers' recommendations on the use of vibration rollers for compaction of soil]. *Vestnik TOGU*. 2014; 2(33): 155-162. URL: <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>. (in Russian)

23. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A., Filatov I.S. Obzor rekomendatsiy proizvoditeley po ispol'zovaniyu vibratsionnykh plit dlya uplotneniya grunta [Overview of manufacturers' recommendations on the use of vibration plates for compaction of soil]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2014; 12: 28-32. (in Russian)

24. Tyuremnov I.S., Razumov S.V., Dotsenko A.I. Metodika rascheta parametrov i rezhimov raboty dvukhmassnykh rabochikh organov trambuyushchikh mashin [Method of calculating parameters and operating modes of two-mass working bodies of ramming machines]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2005; 2: 37-44. (in Russian)

25. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi katkami [Compaction of soil with vibrating rollers]. *Yaroslavl', YAGTU*, 2012. 140 p. (in Russian)

26. Tyuremnov, I.S., Morev A.S. Sistemy nepreryvnogo kontrolya uplotneniya grunta vibratsionnymi katkami [Systems for continuous monitoring of soil compaction by vibrating rollers]. *Yaroslavl', YAGTU*, 2019. 172 p. (in Russian)

27. Tyuremno I.S., Novichikhin. A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi plitami [Soil compaction with vibrating plates]. *Yaroslavl', YAGTU*, 2018. 143 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Федорова Дарья Владимировна – старший преподаватель кафедры «Начертательная геометрия и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 0000-0001-7885-3159 (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88, e-mail: darij30@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyuremnov Ivan S. (Yaroslavl, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Assoc. Prof., Head of Department of Road Construction Machinery, Yaroslavl State Technical University, 0000-0003-2261-4153 (Moskovsky Prospekt, 88, 150023, Yaroslavl, Russia, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru).

Darya V. Fedorova Darya V. (Yaroslavl, Russian Federation) – senior lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Yaroslavl State Technical University, 0000-0001-7885-3159 (Moskovsky Prospekt, 88, 150023, Yaroslavl, Russia, e-mail: darij30@rambler.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюремнов Иван Сергеевич – общее руководство работой, написание текста статьи.

Федорова Дарья Владимировна – подготовка исходных данных.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Tyuremnov Ivan S. – general management of work, writing the text of the article.

Fedorova Darya V. – preparation of initial data.

УДК 629.1.032

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

В.Н. Кузнецова¹, Р.В. Романенко²¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,²Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Высокие темпы освоения новых территорий, развития строительного и дорожно-транспортного комплекса, добычи и транспортировки полезных ископаемых невозможно без машин и оборудования. Использование в качестве базового шасси гусеничного движителя имеет как преимущества, так и недостатки. Одной из главных проблем является обеспечение подвижности гусеничной техники. Использование силовых агрегатов и трансмиссий смешанных типов позволяет решить эту научную проблему и обеспечить эффективность выполнения технологических операций при эксплуатации гусеничных машин.

На современных транспортных машинах применяются трансмиссии самых различных типов, в том числе и электромеханические трансмиссии (ЭМТ). В такой конструкции преобразование крутящего момента и изменение частоты вращения ведущих колес гусеничного движителя осуществляется за счет тяговых электродвигателей (ТЭД). Целью применения в составе гусеничных машин электромеханической трансмиссии является повышение тягово-динамических свойств и топливной экономичности и, как следствие, улучшение свойства подвижности машины. Объединение в составе гусеничной машины (ГМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрических машин позволяет максимально использовать преимущества последних и компенсировать недостатки, присущие каждому из них. Улучшение этих показателей достигается главным образом за счет различных рабочих характеристик тягового электрического двигателя (ТЭД) и накопителя энергии (НЭ).

Методы исследования. В качестве базовой основы проведенных теоретических исследований служил системный анализ. Разработана математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией. Использовались методы теории алгоритмов.

Результаты. Разработана и приведена структурная схема компоновки последовательного типа электромеханической трансмиссии гусеничной машины, защищенная патентом РФ. Разработан алгоритм взаимодействия ее элементов с учетом различных режимов движения машины. Приведены основные математические зависимости, входящие в методику обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией.

Обсуждение и заключение. Использование разработанных подходов и методики позволят производить расчет составных элементов электромеханической трансмиссии для обеспечения требуемой подвижности гусеничной машины, оценивать ее топливную экономичность, а также ее максимальную и среднюю скорость движения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гусеничная машина, электромеханическая трансмиссия, методика, алгоритм.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Поступила 16.09.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Основные аспекты методики обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>

© Кузнецова В.Н., Романенко Р.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>

BASIC ASPECTS OF METHODOLOGY FOR JUSTIFYING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A TRACKED MACHINE WITH ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION

V.N. Kuznetsova¹, R.V. Romanenko²

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Automobile and Highway University (SibADI),

²Omsk Automobile and Armored Engineering Institute
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. High rates of new territories development, the development of the construction and road-transport complex, mining and transportation of minerals is impossible without machinery and equipment. The use of a caterpillar propeller as a base chassis has both advantages and disadvantages. One of the main problems is ensuring the mobility of tracked vehicles. The use of mixed-type power units and transmissions allows solving this scientific problem and ensuring the efficiency of technological operations during the operation of tracked vehicles.

Modern vehicles use a variety of transmission types, including electromechanical transmission (EMT). In such a design, torque conversion and change in the speed of the drive wheels of the caterpillar propulsion device are carried out by means of traction electric motors (TEM). The aim of the use of electromechanical transmission in tracked machines is to increase the tractive-dynamic properties and fuel economy and, as a result, to improve the mobility of the machine. The combination of an internal combustion engine (ICE) and electric machines in a caterpillar machine (CM) makes it possible to maximize the advantages of the latter and compensate for the disadvantages of each. These improvements are achieved mainly through the different performance characteristics of the traction electric engine (TEE) and the energy storage device (ESD).

Research methods. A system analysis served as the basis for the theoretical studies. A mathematical model of the motion of a tracked vehicle with an electromechanical transmission has been developed. The methods of the theory of algorithms were used.

Results. A structural diagram of the arrangement of a series connection of elements of an electromechanical transmission of a tracked vehicle, protected by a patent of the Russian Federation, has been developed and presented. An algorithm has been developed for the interaction of its elements taking into account the movement of the machine. The main mathematical relationships included in the methodology for substantiating the operational characteristics of a tracked vehicle with an electromechanical transmission are presented.

Discussion and conclusion. Using the developed approaches and methodology, it will be possible to calculate the components of the electromechanical transmission in order to ensure the required mobility of the caterpillar machine, to assess its fuel economy, as well as its maximum and average speed.

KEYWORDS: tracked vehicle, electromechanical transmission, method, algorithm.

GRATITUDES. The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article.

Submitted 16.09.20, revised 23.10.2020.

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: Kuznetsova V.N., Romanenko R.V. Basic aspects of the justification procedure performance characteristics tracked machine with electromechanical transmission. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>

© Kuznetsova V.N., Romanenko R.V.



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

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в развитии и производстве малогабаритных электрических машин, силовой и управляющей электроники, накопителей энергии с высокой емкостью [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] способствуют совершенствованию и модернизации транспортных машин, оснащенных гибридными силовыми установками и электромеханическими трансмиссиями не только для колесной техники, но и для гусеничной техники гражданского и военного назначения [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. В связи с этим перспективными направлениями исследования являются: определение и обоснование конструктивных параметров агрегатов электромеханической трансмиссии, гибридной силовой установки, различные режимы работы электромеханической трансмиссии при эксплуатации гусеничной машины. Электромеханическая трансмиссия гусеничной машины представляет собой сложный технический объект, в котором организуется совместная работа целого комплекса отдельных устройств. При этом каждое звено такой системы нацелено на решение общей задачи – повышение тягово-динамических свойств, увеличение запаса хода, улучшение топливной эффективности машины. Необходимым условием достижения данной цели является определение рациональных характеристик основных элементов электромеханической трансмиссии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой выполняемых расчетов являются требования к подвижности разрабатываемой гусеничной машины, а также конструктивные параметры и характеристики ее комплектно-тягового силового электрооборудования (гибридная силовая установка, накопители энергии, тяговые электрические двигатели). Для обоснования эксплуатационных характеристик разрабатываемой гусеничной машины (ГМ) с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) необходимо провести расчеты показателей тягово-динамических свойств и топливной экономичности.

Основными этапами методики проведения расчетов являются:

- установление исходных данных (тип машины, ее основные параметры, условия эксплуатации, технические требования к комплексному показателю подвижности и др.);
- разработка базовой структурной схемы электромеханической трансмиссии;
- определение временной зависимости суммарной мощности на ведущие колеса, требуемой для преодоления сил сопротивления при движении машины;
- предварительный выбор основного тягового силового оборудования и установление его расчетных параметров;
- разработка алгоритма работы электромеханической трансмиссии, обеспечивающего минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении;
- расчет энергетических характеристик электромеханической трансмиссии и распределения передаваемой мощности на ведущие колеса для различных участков движения (в том числе уточнение методом последовательных приближений оптимального соотношения мощности к ведущим колесам от гибридной силовой установки и от накопителей энергии);
- расчет топливно-экономических характеристик электромеханической трансмиссии в цикле движения ГМ для вариантов соотношений величин, передаваемой мощности на ведущие колеса по механическому и электромеханическому каналам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации расчета разработана математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией для различных режимов движения (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение) [19]. Математическая модель разработана с учетом структурной схемы компоновки последовательного соединения элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины¹ (рисунок 1). В последовательной схеме тяговое усилие создается только электроприводом. Поскольку гибридная силовая установка (ГСУ), состоящая из двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и генератора, не создает непосредственно тяговое усилие на

¹ Патент на полезную модель RU 196668 Российская Федерация, МПК В62D55/08. Электромеханическая трансмиссия гусеничной машины / Романенко Р.В., Сергеев В.В., Дружинин П.В., Дмитрук А.В.; заявитель и патентообладатель ФГКВУ ВО «Военная академия МТО им. генерала армии А.В. Хрулева» МО РФ. – № 2019125086; заявл. 06.08.2019; опубл. 11.03.2020, бюл. № 8.

ведущие колеса, то мощность, передаваемая ГСУ, должна быть не меньше, чем средняя мощность, требуемая для движения машины, а развиваемая мощность и момент тягового электродвигателя (ТЭД) должны соответствовать максимальной мощности и максимальной тяговой силе.

Управление работой электромеханической трансмиссии осуществляется блоком управления (БУ), обеспечивающей контроль и управление основными элементами электромеханической трансмиссии [20, 21]. Блок управления электромеханической трансмиссией обрабатывает информацию о текущем состоянии отдельных агрегатов трансмиссии, величинах задающих сигналов и формирует управляющие сигналы:

- по мощности ДВС, передаваемой на ведущие колеса;
- по частоте вращения коленчатого вала ДВС;
- по напряжению, току якоря и току возбуждения генератора;
- по напряжению, току якоря и току возбуждения тяговых электродвигателей;
- по температуре якоря и частоте вращения тяговых электродвигателей;

- по напряжению на клеммах и току нагрузки/зарядки накопителей энергии.

В блок управления ЭМТ поступают также управляющие сигналы от датчиков величин тяговой мощности и тока якоря тяговых электродвигателей в режиме рекуперативного торможения.

Последовательность и условия распределения мощности в электромеханической трансмиссии должны основываться на условиях движения и обеспечивать выполнение требований к динамике, а также обеспечивать минимальный расход топлива ДВС.

Из приведенной структурной схемы (см. рисунок 1) следует возможность реализации двух режимов работы ЭМТ:

1. Раздельная работа дизель-генератора и накопителя энергии.
2. Совместная работа дизель-генератора и накопителя энергии.

Различие данных режимов состоит в том, что при раздельной работе Г и НЭ на отдельных участках движения энергия поступает на ТЭД только от генератора. При совместной работе имеет место одновременная работа Г и НЭ на ТЭД.

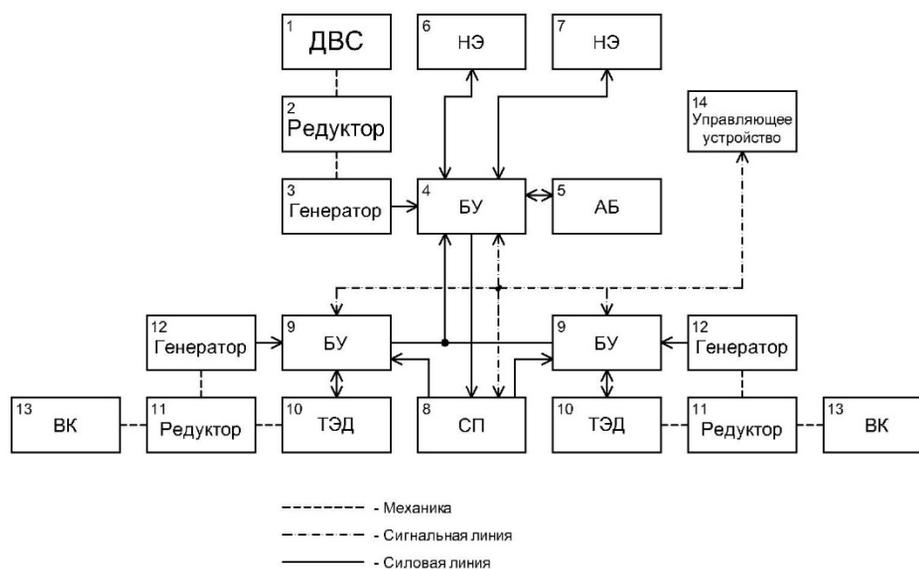


Рисунок 1 – Структурная схема компоновки последовательного соединения элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; НЭ – накопитель энергии; АБ – аккумуляторная батарея; ТЭД – тяговый электродвигатель; ВК – ведущие колеса; БУ – блок управления; СП – силовой преобразователь

Figure 1 – Block diagram of the serial connection layout elements of electromechanical transmission of a tracked vehicle ICE – internal combustion engine; ES – energy storage; SB – storage battery; TM – traction motor; DW – driving wheels; CU – control unit; PC – power converter

Целесообразность реализации того или иного режима зависит от нескольких факторов, среди них основными являются:

- требуемые значения момента для обеспечения движения в заданных условиях;
- степень заряженности НЭ;
- оптимальные (по условиям минимизации удельного расхода топлива) значения момента и частоты вращения вала ДВС.

Основываясь на возможных режимах работы электромеханической трансмиссии последовательного типа и основных мероприятиях по организации эффективной работы дизель-генератора в составе ЭМТ можно предложить базовый алгоритм функционирования агрегатов энергоустановки и выбора оптимального с точки зрения энергетической эффективности режима работы ЭМТ, представленный на рисунке 2.

Согласно предложенному алгоритму работы электромеханической трансмиссии можно выделить следующие основные режимы работы:

1. Режим интенсивного разгона и поворота. Данный режим необходим для обеспечения динамических показателей ГМ, а также для преодоления препятствий. При этом требуемая для реализации заданного ускорения и скорости мощность и соответственно момент на валу ТЭД обеспечивается совместной работой Г и НЭ. Разгон и поворот машины осуществляются по схеме: ДВС – Г – И – ТЭД – БР – ВК (Г – генератор, И – инвертор, БР – бортовой редуктор). Распределение потоков мощности от ДВС и от НЭ производится блоком управления (БУ) в соответствии с алгоритмом управления.

2. Режим равномерного движения ГМ. Этот режим целесообразен в случае, когда требуемый момент на валу ТЭД превышает момент ДВС, $M_{ТЭД} > M_{ДВС}$, однако частота вращения ДВС соответствует оптимальной по значению удельного расхода топлива. Обеспечивается работой только генератора. Равномерное прямолинейное движение выполняется с приводом ведущих колес по схеме: ДВС – Г – И – ТЭД – БР – ВК. В этом случае возможен заряд накопителей энергии от генератора по каналу ДВС – Г – И – НЭ.

3. Режим движения, когда требуемый момент на валу ТЭД равен моменту ДВС, $M_{ТЭД} = M_{ДВС}$. Движение осуществляется только за счет энергии генератора, при этом часть энергии поступает на заряд накопителя.

4. Режим снижения скорости движения. В данном режиме момент и частота вращения

вала ТЭД меньше $M_{ДВС}$, $M_{ТЭД} < M_{ДВС}$. В этом случае кинетическая энергия машины передается на заряд НЭ по каналу ВК – БР – ТЭД – И – НЭ.

Под оптимальными значениями крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала ДВС подразумеваются такие значения и $M_{ДВС}$ и $n_{ДВС}$, при которых достигаются минимальные значения удельного расхода топлива g для данной мощности ДВС.

Особенностью предложенного алгоритма управления ЭМТ является то, что определено условие подключения второго потока мощности от накопителя энергии, которым является перегрузка ДВС по моменту, а в качестве органа управления движением ГМ рассматривается силовой преобразователь (ПС), параметры которого можно изменять во времени для изменения режимов движения (разгон, поворот, движение с постоянной скоростью, торможение). В силовом преобразователе изменение параметров обеспечивает «коэффициент трансформации», характеризующий кратность уменьшения напряжения после ПС, на входе ТЭД. До силового преобразователя потенциал равен напряжению генератора, а после равен напряжению генератора, деленному на коэффициент трансформации. Такая схема работы электромеханической трансмиссии обеспечивает минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении.

Блок-схема алгоритма работы электромеханической трансмиссии разработана с учетом различных режимов движения гусеничной машины (разгон, криволинейное движение (поворот), торможение) [22], что обеспечивает минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении (рисунок 2) [23, 24].

Сила тяги на ведущих колесах ГМ выражается через электромеханические характеристики ТЭД.

К электромеханическим характеристикам относятся зависимости следующих величин от тока электродвигателя $I_{ТЭД}(I_{Я})$:

- число оборотов якоря электродвигателя (скорость вращения) $n_{д}$;
- вращающий момент на валу электродвигателя M ;
- коэффициент полезного действия электродвигателя $\eta_{д}$.

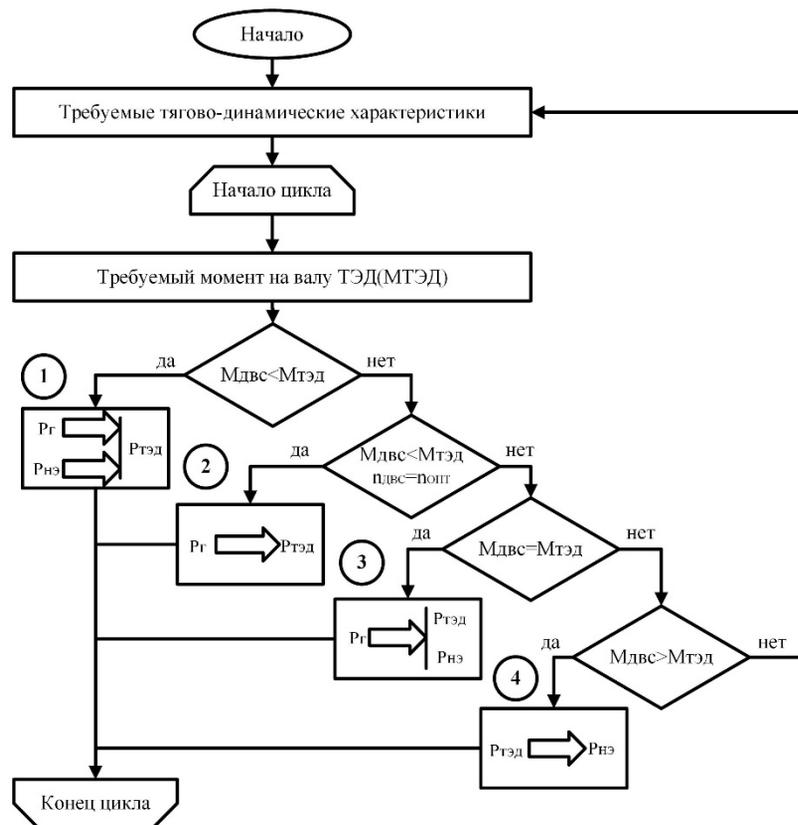


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма взаимодействия элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины: Ртэд – мощность электрического тока тягового электродвигателя; Рг – мощность электрического тока генератора; Рнэ – плотность электрической энергии накопителя энергии; Мдвс – момент дизель-генератора; Мтэд – момент тягового электрического двигателя

Figure 2 – Block diagram of the interaction algorithm of elements electromechanical transmission of a tracked vehicle:

Pтэд – traction motor electric current; Pг – generator electric current; Pнэ – energy storage device electrical energy density; Мдвс – diesel generator moment; Мтэд – traction engine moment

Характеристика $M_{ТЭД}$ ($I_{ТЭД}$) определяется путем пересчета с использованием характеристик $\eta_{ТЭД}(I_{ТЭД})$ по формуле

$$M_{ТЭД} = \frac{U_{ТЭД} \cdot I_{ТЭД} \cdot \eta_{ТЭД}}{\omega}, \quad (1)$$

где $M_{ТЭД}$ – вращающий момент на валу тягового электродвигателя, Н·м; $U_{ТЭД}$ – напряжение на тяговом электродвигателе, В; $\eta_{ТЭД}$ – коэффициент полезного действия тягового электродвигателя; ω – угловая скорость якоря электродвигателя.

На основе работ, посвящённых данной тематике [25] – [28], усовершенствована математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, отличительной особенностью которой яв-

ляется учет электрических, магнитных потерь, возникающих в тяговых электрических двигателях:

$$\ddot{X}_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \cdot \cos \varphi + S_T \sin \varphi]; \quad (2)$$

$$Y_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \cdot \sin \varphi + S_T \cos \varphi]; \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J_c} [(P_2 - P_1 + P_{f1} - P_{f2}) \cdot \frac{B}{2} + \text{sign} \varphi \cdot M_c]; \quad (4)$$

$$\ddot{\omega}_{ТЭД1} = \left[M_{ТЭД1} \cdot i_p \cdot \eta_p - \frac{M_{к1}}{\eta_{ГД}} + \frac{P_1 \cdot r_{ВК}}{\eta_{ГД}} - M_{Т1} \right] \cdot \frac{1}{J_1}; \quad (5)$$

$$\ddot{\omega}_{ТЭД2} = \left[M_{ТЭД2} \cdot i_p \cdot \eta_p - \frac{M_{к2}}{\eta_{ГД}} + \frac{P_2 \cdot r_{ВК}}{\eta_{ГД}} - M_{Т2} \right] \cdot \frac{1}{J_2}; \quad (6)$$

В системе уравнений (2) – (6) использованы следующие обозначения: T – текущее время, с; X_C, Y_C – координаты центра тяжести машины, м; φ – курсовой угол, рад; $\omega_{ТЭД1}, \omega_{ТЭД2}$ – частоты вращения генератора и тяговых электродвигателей, рад/с; m – масса машины, кг; P_1, P_2 – силы тяги на ведущих колесах, Н; P_{f1}, P_{f2} – сопротивление передвижению колёс, Н; S_T – сила сопротивления боковому перемещению всех колёс, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колёс о грунт; J_C, J_1, J_2 – момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести и бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг; $M_C, M_{ТЭД1}, M_{ТЭД2}, M_{Т1}, M_{Т2}, M_{K1}, M_{K2}$ – моменты сопротивления боковому перемещению генератора, электродвигателей, механических тормозов и на ведущих колесах соответственно, Нм; r_{BK} – радиус ведущего колеса, м; i_p – передаточные числа в редукторе; $\eta_p, \eta_{ГД}$ – КПД редуктора и гусеничного движителя.

Мощность ведущих колёс машины N_{BK} с электромеханической трансмиссией последовательного типа определяется зависимостью [25]:

$$N_{BK}(t) = N_{ГСУ}(t) \cdot \eta_G \cdot \eta_{и} \cdot \eta_{ТЭД} + N(t)_{НЭ} \cdot \eta_{и} \cdot \eta_{ТЭД}, \quad (7)$$

где $N_{ГСУ}, N_{НЭ}$ – мощность гибридной силовой установки и накопителя энергии соответственно; $\eta_G, \eta_{и}, \eta_{ТЭД}$ – коэффициент полезного действия генератора, инвертора, тягового электродвигателя соответственно.

Следует отметить, что величина мощности ГСУ образца с электромеханической трансмиссией последовательного типа в процессе разгона $N_{ГСУ_{пос}}^P$ как правило постоянна и должна соответствовать средней мощности, требуемой для ее движения. Мощность тягового электродвигателя и, соответственно, мощность накопителей энергии $N_{НЭ}^P$ выбираются из условия необходимости обеспечения требуемой максимальной мощности и тягового усилия на разгоне.

Суммарная энергия $A_{ГСУ}^P$ на этапе разгона определяется по формуле

$$A_{ГСУ_{пос}}^P = N_{ГСУ_{пос}}^P \cdot t_p + N_{НЭ}^P + t_p^{HЭ}, \quad (8)$$

где t_p – время разгона образца, $N_{НЭ}^P, N_{ГСУ_{пос}}^P$ – мощность гибридной силовой установки и накопителя энергии соответственно; $t_p^{HЭ}$ – время, в течение которого в процессе разгона поступает энергия от НЭ к ТЭД, с.

Мгновенный расход топлива определяется по формуле

$$G_m^{MG} = \left(\frac{(c \cdot k_{3i} + d) \cdot n^i + p \cdot k_{3i} + \mu}{113} \right) \cdot G_{mN}, \quad (9)$$

где G_m^{MG} – мгновенный расход топлива на i -м интервале, кг/час; c, d, p, μ – коэффициенты аппроксимации для двигателей внутреннего сгорания ($c = 3,125 \cdot 10^{-4}$ кг/ч/об/мин, $d = 1,25 \cdot 10^{-2}$ кг/ч/об/мин, $p = 0,3917$ кг/ч, $\mu = -13,67$ кг/ч); k_{3i} – загрузки двигателя на i -м интервале, %; n – частота вращения коленчатого вала двигателя на i -м интервале; G_{mN} – расход топлива в режиме максимальной мощности, кг/ч.

Суммарная потребляемая мощность ГСУ $N_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma nc}$ определяется из выражения

$$N_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma nc} = N_{ГСУ_{пос}}^{ДВ} + N_{ГСУ_{пос}}^{зар}, \quad (10)$$

где $N_{ГСУ_{пос}}^{ДВ}$ – потребляемая объектовая мощность ГСУ для движения с постоянной заданной скоростью, Вт; $N_{ГСУ_{пос}}^{зар}$ – мощность ГСУ, расходуемая на заряд накопителей энергии электромеханической трансмиссии последовательного типа, Вт.

КПД электромеханического канала $\eta_{ЭМ}^{ЗС}$ определяется из зависимости

$$\eta_{ЭМ}^{ЗС} = \eta_G^{ЗС} \cdot \eta_{НЭ}^{ЗС} \cdot \eta_{ТЭД}^{ЗС}, \quad (11)$$

где $\eta_G^{ЗС}, \eta_{НЭ}^{ЗС}, \eta_{ТЭД}^{ЗС}$ – КПД соответственно тягового генератора, накопителя, тягового электродвигателя.

Суммарная величина требуемой энергии дизель-генератора с ЭМТ последовательного типа за цикл движения образца $A_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma}$ составляет

$$A_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma} = A_{ГСУ_{пос}}^P + A_{ГСУ_{пос}}^{пс}, \quad (12)$$

где $A_{ГСУ_{пос}}^P$ – энергия, затраченная на движение на участках трассы при разгоне гибридной силовой установки с электромеханической трансмиссией последовательного типа, $A_{ГСУ_{пос}}^{пс}$ – энергия, затраченная на движение на участках трассы при постоянной скорости.

Средняя величина требуемой мощности ГСУ с электромеханической трансмиссией последовательного типа за цикл движения машины составит

$$N_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma} = A_{ГСУ_{пос}}^{\Sigma} / t_{\Sigma}, \quad (13)$$

где $t_{ц}$ – суммарное время движения по участку типовой трассы, с, $A_{ГСУ\text{плос}}^ц$ – суммарная величина требуемой энергии дизель-генератора с ЭМТ последовательного типа за цикл движения образца.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения мощности при заданных параметрах гусеничной машины позволяют провести предварительный выбор его основного тягового оборудования – ДВС и генератора (ГСУ), тяговых электрических машин и накопителей энергии. Основные эксплуатационные параметры накопителей энергии (плотность энергоёмкости, плотность электроэнергии, время заряда и разряда, внутреннее сопротивление) определяются исходя из заданных и расчетных массовых, эксплуатационных и энергетических параметров.

Последующий анализ полученных расчетных характеристик электромеханической трансмиссии позволят провести:

- оптимизацию области рабочих режимов и состава тягового оборудования;
- оптимизацию алгоритма работы с заданными фактическими характеристиками агрегатов в режимах движения.

Реализация методики позволяет производить расчет составных элементов электромеханической трансмиссии для обеспечения требуемой подвижности гусеничной машины, оценивать ее топливную экономичность, а также ее максимальную и среднюю скорость движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дидманидзе О.Н., Иванов С.А., Пуляев Н.Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии. Москва, Мегаринт, 2018. 189 с.
2. Гук М.Э., Юденков В.С. Синтез оптимального регулятора с переключаемой структурой для управления асинхронным электродвигателем: материалы конф. Минск, БГУИР, 2014. 359-362 с.
3. Gai J., Huang Sh., Zhou G., Li Sh. Design method of power coupling mechanism scheme for double side motors coupling drive transmission // China Mechanical Engineering. 2014. 25(13). С. 1739-1743. DOI.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.
4. Aspalli M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2012. Vol. 1. Pp. 463-469.
5. Rachana G., Priya M., Parmod K., Rohit G. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply // Journal of Automation and Control Engineering. 2014. Vol. 2. № 3. Pp. 221-227.
6. Кулаков Н.А., Селифонов В.В., Черанёв С.В. Выбор оптимальной конструкции механической части электрической трансмиссии специального колесного шасси 8x8 // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1. 78-82.
7. Gomberg B.N., Kondakov S.V., Nosenko L.S. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission // Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series. 2012. Issue 18. No.37. Pp. 73-81.
8. Тышкевич С.А. Перспективы развития автомобилей с гибридной силовой установкой // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплекс: проблемы, перспективы, инновации». Омск, СибАДИ, 2019. С. 148-151.
9. Лепешкин А.В. Критерии оценки энергоэффективности многоприводных колесных машин. Москва, Автомобильная промышленность, 2010. № 10. С. 19-23.
10. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанев С.В. Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией. Москва, Известия МГТУ «МАМИ», 2011. № 2 (12). С. 95-105.
11. Robert William T. Drive configuration for skid steering vehicles. USA. US2010/0184550 A1[P]. 2010. 7. 22 p.
12. Polak F., Walentynowics J., Simulation of the hybrid propulsion system for the small unmanned vehicle // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011 Vol. 18. No.1. 471-478.
13. Савинкин В.В., Кузнецова В.Н. Разработка конструкции гибридного привода поворотной платформы землеройной машины для выполнения строительных работ // Вестник СибАДИ. 2015. № 1 (41). С. 17-24.
14. Коротких Ю.С. Современное состояние машинно-тракторного парка Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития / Ю. С. Коротких, Ю. В. Чутчева // Международный технико-экономический журнал. 2016. № 6. 25-29.
15. Исаков П.П. Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчёт. Ленинград, Машиностроение, 1981. 302 с.
16. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks // International Journal of Heavy Vehicle Systems 19 (03). 256-280. doi. 10.1504/IJHVS.2012.047916.
17. Walentynowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011. Vol.18, № 1. 471-478.
18. Colyer Ron E. The use of electric and hybrid-electric drives in military combat vehicles. Journal of Battlefield Technology. 2003. Vol. 6. № 3. 11-15.
19. Романенко Р.В., Дружинин П.В., Сергеев В.В. Реализуемая схема комбинированной силовой установки с электромеханической трансмиссией наземного робототехнического комплекса, выполняющего задачи материально-технического обеспечения // Наука и военная безопасность. Омск, ОАБИИ. 2018. № 12. С. 21-26.

20. Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. Москва, Машиностроение, 1993. 320 с.

21. Держанский В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины. Курган, Изд-во Курганского гос. ун-та. 2010. 142 с.

22. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. Москва, Машиностроение, 1970. 176 с.

23. Романенко Р.В. Сергеев В.В. Моделирование криволинейного движения роботизированной военной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 8. № 1. Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК. 2020. 34-40.

24. Щербо А.Н., Наумов А.Н., Щербо Е.В., Маклюков А.И. Типовые циклы движения гусеничных образцов бронетанкового вооружения и техники // Наука и военная безопасность. 2017. № 1 (8). 64-68.

25. Носов Н.А., Галышев В.Д., Волков Ю.И., Харченко А.И. Расчёт и конструирование гусеничных машин / Н.А. Носов, В.Д. Галышев, Ю.И. Волков, А.И. Харченко. Ленинград, Машиностроение, 1972. 360 с.

26. Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 12.

27. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины // Известия вузов. 2012. №1. С. 49–59.

28. Горелов В.А. Математическое моделирование многозвенных колесных транспортных комплексов с учетом особенностей конструкций сцепных устройств // Наука и образование. 2012. № 2.

REFERENCES

1. Didmanidze O.N., Ivanov S.A., Pulyaev N.N. Effektivnost' tyagovo-transportnyh sredstv pri ispol'zovanii nakopitelej energii [Efficiency of traction vehicles when using energy storage devices]. Moscow: Megaprint. 2018. 189. (in Russian)

2. Guk M.E., Yudenkov V.S. Sintez optimal'nogo regulatora s pereklyuchaemoj strukturoj dlya upravleniya asinhronnym elektrodvigatelem [Synthesis of an optimal regulator with a switchable structure for controlling an asynchronous electric motor: materials conf.]. Minsk, BSUIR. 2014.359 -362. (in Russian)

3. Gai J., Huang Sh., Zhou G., Li Sh. Design method of power coupling mechansism scheme for double side motors coupling drive transmission. *China Mechanical Engineering*. 2014; 25(13): 1739-1743. DOI: org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.

4. Aspalli M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012; 1: 463-469.

5. Rachana G., Priya M., Parmod K., Rohit G. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply.

Journal of Automation and Control Engineering. 2014; 2(3): 221-227.

6. Kulakov N.A., Selifonov V.V., Cheranyov S.V. Vybor optimal'noj konstrukcii mekhanicheskoy chasti elektricheskoy transmissii special'nogo kolesnogo shassi 8x8 [The choice of the optimal design of the mechanical part of the electric transmission of the special wheeled chassis 8x8]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2010; 1: 78-82. (in Russian)

7. Gomberg B.N., Kondakov S.V., Nosenko L.S. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission. *Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series*. 2012; 18(37): 73-81.

8. Tyshkevich S.A. Perspektivy razvitiya avtomobilej s gibridnoj silovoj ustanovkoj [Prospects for the development of vehicles with a hybrid power plant]. *Collection of materials of the III International scientific and practical conference «Architectural and construction and road transport complex: problems, prospects, innovations»*. 2019. 148-151. (in Russian)

9. Lepeshkin A. V. Kriterii ocenki energoefektivnosti mnogoprivodnyh kolesnyh mashin [Criteria for evaluating the energy efficiency of multi-drive wheeled vehicles]. Moscow, Automotive industry. 2010; 10: 19-23. (in Russian)

10. Kulakov N.A., Lepeshkin A.V., Cheranev S.V. Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli polnoprivodnogo chetyrekhosnogo avtomobilya s elektrottransmissiej [Development and research of a mathematical model of an all-wheel drive four-axle vehicle with electric transmission]. *Izvestiya MSTU «MAMI»*. 2011; 2 (12): 95-105.

11. Robert William T. Drive configuration for skid steering vehicles. US2010/0184550 A1[P]. 2010-7-22.

12. Polak F., Walentynowics J., Simulation of the hybrid propulsion system for the small unmanned vehicle // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011; 18(1): 471-478.

13. Savinkin V.V., Kuznetsova V.N. Razrabotka konstrukcii gibridnogo privoda povorotnoj platformy zemlerojnoj mashiny dlya vypolneniya stroitel'nyh rabot [Development of the design of a hybrid drive of a rotary platform of an earthmoving machine for performing construction work]. *Bulletin of SibADI*. 2015; 1 (41): 17-24. (in Russian)

14. Korotkikh Yu.S., Chutcheva Yu.V. Sovremennoe sostoyanie mashinno-traktornogo parka Rossijskoj Federacii: osnovnye tendencii i perspektivy razvitiya [Current state of the machine and tractor fleet of the Russian Federation: main trends and development prospects]. *International technical and economic journal*. 2016; 6: 25-29. (in Russian)

15. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnyh traktorov. Teoriya i raschyot [Electromechanical transmissions of tracked tractors. Theory and calculation]. *Mechanical engineering*. 1981.302 p. (in Russian)

16. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 19 (03). 256-280. DOI: 10.1504/IJHVS.2012.047916.

17. Walentynowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011; 18(1): 471-478.

18. Colyer Ron E. The use of electric and hybrid-electric drives in military combat vehicles. *Journal of Battlefield Technology*. 2003; 6 (3): 11-15.

19. Romanenko R.V., Druzhinin P.V., Sergeev V.V. Realizuemaya skhema kombinirovannoy silovoj ustanovki s elektromekhanicheskoy transmissiej nazemnogo robototekhnicheskogo kompleksa, vypolnyayushchego zadachi material'no-tehnicheskogo obespecheniya [The implemented scheme of a combined power plant with an electromechanical transmission of a ground-based robotic complex, performing the tasks of material and technical support]. *Science and military security: Scientific and practical journal*. 2018; 12: 21-26. (in Russian)

20. Savochkin V.A. Statisticheskaya dinamika transportnyh i tyagovyh mashin [Statistical dynamics of transport and traction machines]. Moscow, Mechanical engineering. 1993. 320 p. (in Russian)

21. Derzhansky V.B., Taratorkin I.A. Algoritmy upravleniya dvizheniem transportnoj mashiny [Algorithms for controlling the movement of a transport vehicle: monograph]. Kurgan, Publishing house of the Kurgan state un-that. 2010. 142 p.

22. Farobin Ya.E. Teoriya povorota transportnyh mashin [The theory of rotation of transport vehicles]. Moscow, Mechanical Engineering, 1970. 176 p. (in Russian)

23. Romanenko R.V., Sergeev V.V. Modelirovanie krivolinejnogo dvizheniya robotizirovannoj voennoj gusenichnoj mashiny s elektromekhanicheskoy transmissiej [Modeling curvilinear movement of a robotic military tracked vehicle with electromechanical transmission]. *Robotics and technical cybernetics*. 2020; 8(1): 34-40. (in Russian)

24. Shcherbo A.N., Naumov A.N., Shcherbo E.V., Makoklyuev A.I. Tipovye cikly dvizheniya gusenichnyh obrazcov bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki [Typical cycles of movement of tracked samples of armored weapons and equipment]. *Science and military security*. 2017; 1 (8): 64-68. (in Russian)

25. Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.I., Kharchenko A.I. Raschyot i konstruirovaniye gusenichnyh mashin [Calculation and design of tracked vehicles]. Leningrad, Mashinostroenie, 1972. 360 p. (in Russian)

26. Kotiev G.O., Gorelov V.A., Miroshnichenko A.V. Sintez sistemy upravleniya tyagovymi elektrodvigatelyami dlya individual'nogo privoda vedushchih koles avtomobilya [Synthesis of a traction motor control system for an individual drive of the driving wheels of a car]. *Science and Education: Electronic Scientific and Technical Edition*. 2011; 12. (in Russian)

27. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. Razrabotka zakona upravleniya individual'nym privodom dvizhitelej mnogoosnoj kolesnoj mashiny [Development of a control law for the individual drive of propellers of a multi-axle wheeled vehicle]. *Proceedings of universities. Mechanical engineering*. 2012; 1: 49-59. (in Russian)

28. Gorelov V.A. Matematicheskoe modelirovanie mnogozvennyh kolesnyh transportnyh kompleksov s

uchetom osobennostej konstrukcij scepnyh ustrojstv [Mathematical modeling of multi-link wheeled transport systems taking into account the design features of coupling devices]. *Science and Education*. 2012; 2. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы исследований. Формулировка направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (50%).

Романенко Р.В. Обзор результатов предыдущих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Viktoria N. Kuznetsova. A research problem statement. The area and subject of the research statement. A guide to the theme development process. A selection of the research methodology and methods (50%).

Roman R. Romanenko. A review of the results of the previous studies. A research tasks statement. A designation of the algorithm for analytical studies. A results and conclusions statement (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Романенко Роман Владимирович – старший преподаватель 7-й кафедры ремонта бронетанковой и автомобильной техники, Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (ВА МТО) (644098, г. Омск, Военный 14-й городок, 119, roman82enko@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Scopus Author ID 8671569200, Maintenance and Operation of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Romanenko Roman Vladimirovich – Senior lecturer, the 7th Repair of Armored and Automobile Equipment Department, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute, a branch of the A.V. Khrulev Military Academy of Logistics (VA MTO) (644098, Omsk, 14th Military town, 119, roman82enko@mail.ru).

УДК 69.002.5

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597>

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ В ПРИБОРАХ БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ НА ПРИМЕРЕ КРАНОВОГО АНЕМОМЕТРА

В.А. Роцин¹, С.Д. Иванов², А.Н. Назаров²¹ЗАО «Инженерно-технический центр «КРОС», г. Ивантеевка, Россия²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящей статье описывается разработанный авторами алгоритм работы кранового анемометра, измеряющего скорость порывов и среднюю скорость ветра и определяющего на их основе прогнозируемую скорость ветра.

Основная часть. Для построения алгоритма работы анемометра определены основные влияющие параметры и интервалы их измерения. Представлена методика вычисления скорости порывов и средней скорости ветра из показаний импульсного датчика вертушки анемометра. Приведён метод прогнозирования скорости ветра на основе построения экстраполяционной функции.

Результаты. Разработан алгоритм программы работы анемометра с расширенными возможностями по отношению к существующим аналогам. Прибор не только фиксирует значение опасного фактора в данный момент, но и прогнозирует его изменение в будущем.

На основе анализа исследований динамики ветра составлена таблица соответствия уровней определяемых параметров (скорости порыва, средней скорости и прогнозируемой средней скорости ветра) и сигналов, подаваемых оператору крана. Для каждого типа сигналов определено своё значение величины задержки снятия.

Выводы и заключение. Предприятием ЗАО ИТЦ «КРОС» изготовлен опытный образец анемометра, использующего описанные в данной статье принципы. Прибор соответствует всем требованиям нормативно-технической документации. Дальнейшая работа по совершенствованию алгоритма его работы позволит повысить безопасность технологических процессов, осуществляемых с использованием подъёмных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: крановый анемометр, прогнозирование скорости ветра, алгоритм работы анемометра.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъёмно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу разработчиков приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

Поступила 12.10.20, принята к публикации 23.10.20.

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: Роцин В.А., Иванов С.Д., Назаров А.Н. Применение методов прогнозирования опасных факторов в приборах безопасности кранов на примере кранового анемометра. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597>

© Роцин В.А., Иванов С.Д., Назаров А.Н.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597>

HAZARD FORECASTING TECHNIQUES IMPLEMENTATION IN CRANE SAFETY INSTRUMENTS USING A CRANE ANEMOMETER

V.A. Roshchin¹, S.D. Ivanov², A.N. Nazarov²

¹ZAO KROS Engineering and Technical Centre,
Ivanteevka, Russia,

²N.E. Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. This article describes an algorithm developed by the authors for the operation of a crane anemometer that measures the gust rate and average wind speed and determines the predicted wind speed on the basis of it.

The main part. The main influencing parameters and their measurement intervals are defined for the construction of the anemometer algorithm. The method of calculation of gust velocity and average wind velocity from the data of the pulse sensor of the helicopter anemometer is presented. The method of wind speed forecasting based on the construction of an extrapolation function is given.

Results. An anemometer program algorithm with extended capabilities relative to existing analogues has been developed. The instrument not only captures the hazard at the moment, but also predicts its future development. On the basis of the analysis of wind dynamics studies, a table has been compiled of the levels of the determined parameters (gust rate, average speed and projected average wind speed) and the signals given to the operator of the crane. For each type of signal, the value of the removal delay is defined.

Conclusions. ZAO KROS Engineering and Technical Centre has made a prototype anemometer using the principles described in this article. The device meets all requirements of the regulatory and technical documentation. Further work on the improvement of the algorithm of its work will make it possible to increase the safety of technological processes carried out with the use of elevated structures.

KEYWORDS: crane anemometer, wind speed forecasting, anemometer algorithm.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors of the article express their gratitude to the staff of the Elevated-transportation systems Department, N.E. Bauman MGTU and the team of the developers of the security devices of ZAO KROS Engineering and Technical Centre for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

Submitted 12.10.20, revised 23.10.2020.

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: V.A. Roshchin, S.D. Ivanov, A.N. Nazarov. Hazard forecasting techniques implementation in crane safety instruments using a crane anemometer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-584-597>

© Roshchin V.A., Ivanov S.D., Nazarov A.N.



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

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития микропроцессорной техники сегодня позволяет разрабатывать приборы, которые будут не только реагировать на опасные факторы, но и прогнозировать их развитие и до достижения предельных значений информировать машиниста крана. Данный подход к разработке приборов безопасности рассмотрим на примере кранового анемометра.

Скорость ветра является допустимой паспортной характеристикой крана. Сегодня анемометры определяют текущее значение скорости ветра и сравнивают его с допустимым (паспортным), но на момент определения характеристика уже достигнута. Поэтому было решено расширить функционал прибора прогнозированием скорости ветра хотя бы на время нескольких технологических операций, чтобы крановщик мог принять решение о начале рабочего цикла.

На данный момент на российском рынке монопольную позицию занимают анемометры семейства АСЦ-3¹. Принцип их действия заключается в непрерывном измерении частоты вращения вертушки, пропорциональной скорости ветра, и в случае превышения определённого порога в течение определённого времени срабатывает сигнализация и исполнительное реле. В последних моделях добавлена возможность определения средней скорости ветра за устанавливаемый промежуток времени. Как видно из описания работы АСЦ-3, информация о параметрах ветра не проходит дополнительной обработки, с помощью которой можно было бы судить об изменении параметров ветра в будущем, то есть анемометр фиксирует наступившее превышение ветровой нагрузки, которое уже воздействует на кран [1, 2, 3, 4, 5, 6].

В статьях [7, 8, 9] описан способ прогнозирования параметров ветрового потока. Его сущность заключается в обеспечении устойчивости башенных кранов от опрокидывания при пульсирующем воздействии ветровой нагрузки на основе нейросетевой системы управления путем прогнозирования будущего значения скорости ветра. Оно сравнивается с предельно допустимым значением, и выдаётся команда управления на исполнительные органы для корректировки положения стрелы

с целью уменьшения давления на металлоконструкцию башенного крана, обусловленного пульсациями ветровой нагрузки, до того, как опрокидывающий момент от ветровой нагрузки достигнет критического значения. В приводе поворота применена активная система управления, целью которой является обеспечение принудительного поворота стрелы в зависимости от показаний датчиков [10, 11, 12]. Для обучения нейронной сети используются метеорологические данные (максимальная, средняя скорость ветра и его направление) района установки крана. В процессе эксплуатации крана сеть дообучается в конкретных условиях работы.

Недостаток данного метода заключается в необходимости иметь достаточно большие базы данных параметров ветрового потока для различных районов установки крана. Следовательно, прибор, использующий данный метод, или не будет обладать универсальностью (нейросети всех систем будут изначально обучены одинаково), так как в нашей стране присутствуют все ветровые зоны, или будет требовать дополнительной наладки (обучение нейросетей на наборе данных конкретного района установки крана), проводимой высококвалифицированным персоналом, и после этой настройки прибор будет некорректно работать при перемещении крана в другой ветровой район. Кроме того, идея автоматического управления приводами крана на основе показаний анемометра не является общепринятой.

Ещё одним методом получения информации об изменении скорости ветра является применение математической модели на основе цепей Маркова с дискретным временем [13, 14, 15]. Она описывает систему, которая изменяет свои состояния в дискретные моменты времени, согласуясь с некоторым случайным механизмом. Математическая модель изменения скорости ветра содержит вероятности перехода к другим скоростям, то есть вероятность снижения или усиления ветра, а если рассматривать фиксированное время, то ещё и его ускорение.

Цепи Маркова работают с дискретным количеством состояний системы, что требует разделения диапазона возможных скоростей ветра на интервалы. Интервалы разбиения по скорости имеют длину 1–2 м/с, по времени 1–10 сек.

¹ Анемометр сигнальный цифровой АСЦ-3 ТКрЭ 202108.000 ПС Паспорт. URL: <https://ekspertcentre.ru/assets/files/%D0%90%D0%A1%D0%A6-3.pdf> (дата обращения: 02.10.2020).

Цепь Маркова высшего порядка позволяет установить соответствие между рядом последовательных состояний системы в прошлом и вероятностями перехода в определённые состояния в будущем. Следует отметить, что для построения цепей Маркова необходимо воспользоваться достаточным объёмом экспериментальных данных для определения вероятности перехода в цепях событий, а с увеличением длины цепи (то есть при большем периоде прогнозирования) объём требуемых экспериментальных данных быстро нарастает.

Таким образом, не было выявлено единого подхода к решению задачи прогнозирования динамики ветрового потока. Каждый из методов обладает преимуществами и недостатками. Потенциально, так как алгоритмы базируются на метеорологических данных, они должны обладать высокой вероятностью правильных прогнозов, но поэтому же теряют гибкость в различных условиях и требуют сложных технических средств реализации: большей по объёму памяти для хранения предобученной нейросети или цепи Маркова, более мощных микропроцессорных блоков для дообучения и реализации сложных алгоритмов. Кроме того, следует отметить, что все приведённые алгоритмы существуют в рамках теорий и не проходили проверки в реальных условиях.

Цель данной работы – создание алгоритма управления анемометром, который не требует сложной настройки прибора, но при этом будет обеспечивать безопасность технологических процессов с применением подъёмных сооружений, отвечать современному техническому уровню и соответствовать требованиям нормативно-технической документации^{2,3,4,5}.

Для выполнения цели требуется решить следующие задачи:

- определить начальные параметры, необходимые для прогнозирования ветрового потока;
- разработать методику, согласно которой

из начальных параметров получают информацию о необходимости прекращения работы;

- определить информацию, которой нужно снабжать оператора крана и которую необходимо записывать в регистратор параметров.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Необходимо установить, какие параметры необходимо получать, и ограничить диапазон их измерения. Первый из них – максимальное значение скорости ветра, определяемой анемометром.

Согласно карте ветровых районов⁵, максимальная скорость ветра, превышаемая не чаще, чем раз в 5 лет, может достигать 40 м/с. Но это значение не является скоростью ветра рабочего состояния и контролироваться анемометром не должно. По карте ветровых районов было определено, что только два субъекта РФ принадлежат к группе больше V. Это Краснодарский (VI) и Камчатский край (VII).

Замечено, что краны одной и той же серии могут устанавливаться в разных ветровых районах, где соответственно действуют различные ветровые нагрузки. Был проведён анализ линейки кранов КБ (КБ 100 – КБ 674). Эти краны допускается использовать в ветровых районах с I по VII. В зависимости от района допустимая скорость рабочего состояния остаётся постоянной (20 м/с), но, чтобы компенсировать различия в ветровой нагрузке, изменяется исполнение крана, применяемое в конкретных условиях (ограничивается максимальная высота подъёма). Отметим, что в паспортах этих кранов скорость ветра определяется как осреднение за 2 мин.

В статьях [16, 17, 18] приведена информация, что время действия средних скоростей ветра, превышающих 20 м/с, в среднем по всем ветровым районам составляет около 0,4 %.

В соответствии с (табл. 5)⁵ для кранов, установленных на объектах, исключаящих перерывы в работе, максимальная допустимая скорость ветра составляет 28,5 м/с, поэтому

² Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 12 ноября 2013 года N 533 об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъёмные сооружения». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157709/ (дата обращения: 08.08.2020).

³ ГОСТ 32575-2013 Межгосударственный стандарт. Краны грузоподъемные. Ограничители и указатели. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200112635>. (дата обращения 07.05.2020).

⁴ РД 24.090.102-01 Основные требования безопасности к устройству и эксплуатации ветрозащитных систем мостовых и козловых кранов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031551>. (дата обращения: 16.07.2020).

⁵ ГОСТ 1451-77 Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения (с Поправкой) URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007607>. (дата обращения: 16.07.2020).

целесообразно ограничить верхнее значение диапазона настройки определяемой анемометром скорости ветра 30 м/с.

Минимальная допустимая рабочая скорость была найдена для стреловых кранов Liebherr. Она составила 7 м/с⁶. Так как оператора крана необходимо заблаговременно предупредить об усилении ветра, чтобы он успел отреагировать на его усиление (например о достижении 80% от допустимой), то минимальный порог определения скорости следует принять меньше 7 м/с. Нижнюю границу диапазона назначим 5 м/с (80% от 7 м/с).

Далее рассмотрим необходимость определения средней скорости ветра и скорости порывов. Согласно [19, 20] существует 2 основных типа ветра: устойчивый порывистый и шквалистый. При устойчивом порывистом ветре изменение скорости во времени носит характер кратковременных, продолжительностью не более нескольких секунд пульсаций, вокруг примерно постоянного среднего значения. При шквалистом ветре, помимо кратковременных пульсаций, происходит нарастание средней скорости ветра, определенной за достаточно продолжительный по отношению к периоду пульсаций промежуток времени.

Устойчивый порывистый ветер (УПВ) является предсказуемым явлением с той точки зрения, что его среднее значение практически не изменяется, то есть этот режим можно назвать условно стационарным. Переход же к УПВ происходит при нарастании скорости, как в случае шквалистого ветра (ШВ). Чтобы отследить изменение скорости ветра за достаточно продолжительный промежуток времени, необходимо располагать информацией о значениях средней скорости ветра. Прежде всего зададимся периодом осреднения, обеспечивающим фильтрацию коротких по периоду колебаний скорости ветра, но при этом приемлемым с точки зрения получения оперативного прогноза. Общего подхода по определению периода осреднения и единого его значения в различных источниках нет.

Период осреднения составляет от 2 минут^{4,5} до 10 минут^{7,8}. Более продолжительный пери-

од осреднения (10 мин) не позволит достаточно оперативно получить информацию о планомерном нарастании скорости ветра. Поэтому для задачи прогнозирования, а не фиксации значений средней скорости ветра (как в задачах метеорологии), наилучшим из представленного диапазона является меньший период осреднения, то есть 2 мин. Он обеспечивает фильтрацию порывов, кратковременных изменений скорости ветра и вместе с тем отражает динамику развития ветрового процесса.

Но осреднение (за 2 мин) сглаживает значения мгновенной скорости, а если достигается максимально допустимое значение ветра при порыве, то работу крана также следует прерывать. Поэтому кроме определения средней скорости необходимо получать данные о скорости порывов. Между средней скоростью ветра и скоростью порывов имеется связь [21, 22, 23] выраженная статистически полученным коэффициентом, и достижение одной величиной допустимого значения даёт основание полагать, что и вторая в скором времени его достигнет.

В [24, 25] приведены данные о продолжительности порывов. При скоростях ветра 15–20 м/с (в целевом диапазоне измерения) она принимает значения 5–30 сек. Так как при использовании 30-секундного периода осреднения порыва амплитудные значения скорости ветра, достигаемые при большей частоте колебаний, сгладятся, то использование такого продолжительного периода осреднения неприемлемо. Следовательно, необходимо данный период принять равным 5 сек.

Кроме того, хранение непрерывной информации с датчика скорости ветра в течение 2-минутного периода (для подсчёта средней скорости) занимает гораздо больший объём памяти, чем хранение результатов промежуточных осреднений за меньшие промежутки времени. Тогда, если эти промежуточные вычисления будут определяться за интервалы, равные времени осреднения скорости порыва, то удастся совместить две операции и сократить объём памяти и количество требуемых вычислений.

⁶ Liebherr. Учебная документация. Воздействие ветра при работе крана. URL: <https://www.liebherr.com/shared/media/mobile-and-crawler-cranes/brochures/wind-influences/liebherr-influence-of-wind-p403-r04-2017.pdf>. (дата обращения 24.04.2020).

⁷ СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088443>. (дата обращения 15.02.2020).

⁸ СТО 56947007-29.240.055-2010 Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатического районирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088443>. (дата обращения 15.02.2020).

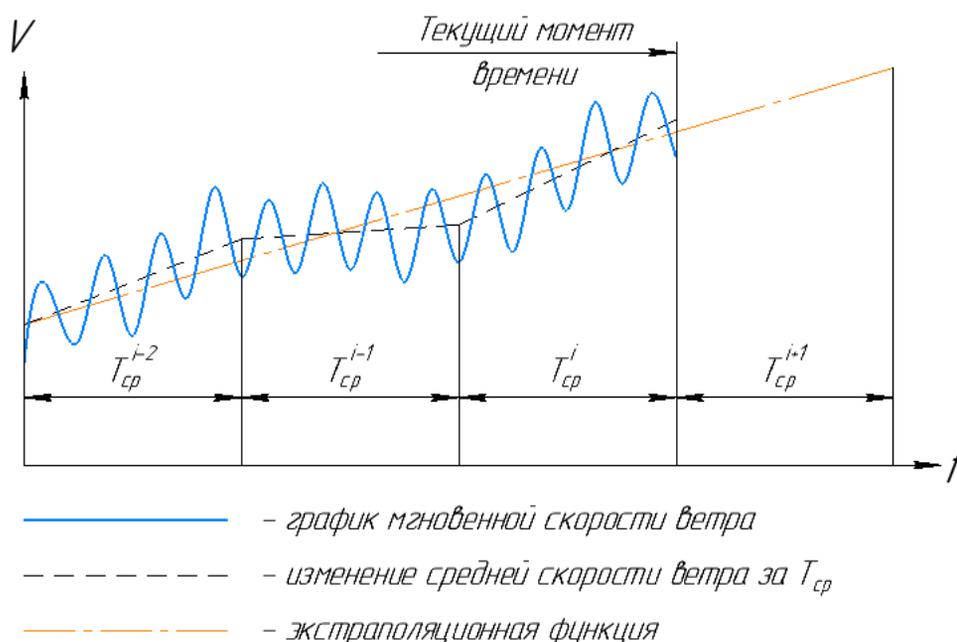


Рисунок 1– Применение экстраполяционной функции для прогнозирования скорости ветра

Figure 1 – Use of extrapolation function for wind speed forecasting

Таким образом установлено, что для анализа ветрового потока необходимо обладать информацией о скорости порывов и средней скорости ветра. На основе обзора литературы и условий использования прибора установлены наилучшие периоды осреднения этих параметров. А на основе анализа нормативно-технической документации приняты пределы измерения скорости ветра.

Рассмотрим реализацию функции определение средней скорости ветра и скорости порыва. В качестве преобразующего элемента (ветер – электрический сигнал) использована вертушка QS-FS 01 с импульсным датчиком. Каждому обороту вертушки соответствует одна ступенька напряжения сигнала, подающегося на вход блока контроля.

Основной цикл программы попеременно выполняет две функции: накопление сигналов и их дальнейшую обработку. Один цикл длится время, равное периоду осреднения скорости порыва ($T_{порыва} = 5$ сек). Число сигналов, накопленных за $T_{порыва}$, делится на время цикла. Далее осреднённая за 5 сек частота домножается на переводные и тарифовочные коэффициенты, таким образом получаем осреднённую скорость порыва. Значения осреднений за $T_{порыва}$ далее используются как промежуточные вычисления в определении средней скорости ветра.

Вычисленное значение скорости за $T_{порыва}$ записывается первым элементом в массив из z элементов. Остальные элементы увеличивают свой номер на 1, а последний удаляется.

$$z = \frac{T_{cp}}{T_{порыва}} = \frac{2[\text{мин}] \cdot 60[\text{с}]}{5[\text{с}]} = 24, \quad (1)$$

где z – число элементов массива осреднения, T_{cp} – время осреднения для получения средней скорости, $T_{порыва}$ – время осреднения для получения скорости порывов.

Отношение суммы элементов данного массива к его длине считаем средней скоростью ветра за период осреднения ($T_{cp} = 2$ мин).

$$V_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{z-1} M[i]}{z}, \quad (2)$$

где V_{cp} – средняя скорость ветра за $T_{cp} = 2$ мин, $M[i]$ – i -й элемент массива осреднения.

На основе данных статьи [17] известно, что при шквалистом ветре в течение времени, кратного периоду осреднения T_{cp} , скорость планомерно нарастает. Имея значения средней скорости ветра за несколько промежутков осреднения, применяем метод экстраполяции, что позволит получить прогноз (рисунок 1).

Информацию о том, какая из функций (линейная, степенная, показательная) наилучшим образом описывает переходные процессы перемещения воздушных масс, на этапе анализа литературы установить не удалось. Поэтому для нахождения наиболее пригодной функции следует в будущем провести серию экспериментов с анемометрами, каждый из которых будет использовать одну из экстраполяционных функций. Далее сравнить наименьшие суммы квадратов невязок (расчитанных методом наименьших квадратов⁹). Лучше описывать переходные процессы будет та функция, суммы квадратов невязок для которой будут наименьшими (рисунок 2).

Кроме ошибки прогноза, допущенной из-за несоответствия экстраполяционной функции реальному динамическому ветровому процессу $\Delta_{\text{прогноза}}$, присутствует ошибка, вызванная особенностью конструкции датчиков скорости ветра чашечного типа $\Delta_{\text{датчика}}$. Для того чтобы предъявить обоснованные требования к $\Delta_{\text{прогноза}}$, определим значение $\Delta_{\text{датчика}}$. Расчётная схема представлена на рисунке 3.

Из дифференциального уравнения

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} - \frac{1}{J} f\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 0 \quad (3)$$

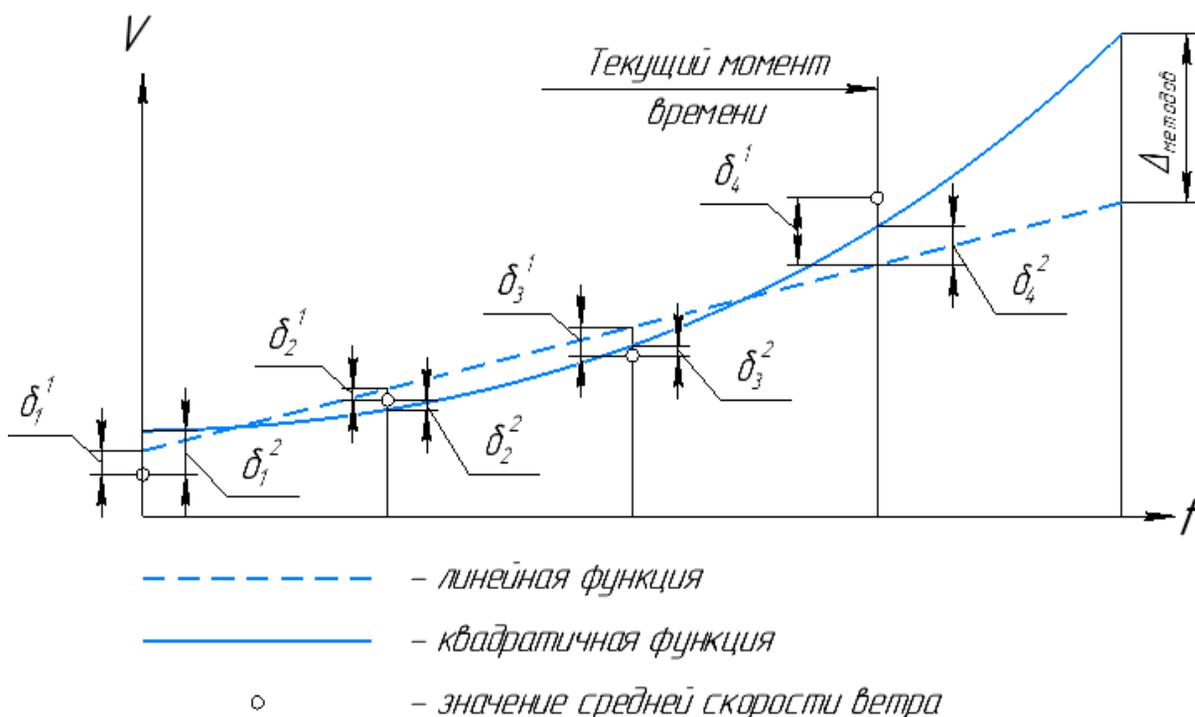


Рисунок 2 – Определение ошибки прогноза при использовании различных экстраполяционных функций:

$\Delta_{\text{методов}}$ – разница между прогнозом линейной и квадратичной функции,

δ_j^i – невязка i -го метода в j -й координате

Figure 2 – Determination of predictive error when using different extrapolation functions:

$\Delta_{\text{методов}}$ – difference between linear and quadratic function prediction,

δ_j^i – difference i -method in j -coordinate

⁹ Кокотушкин Г.А., Федотов А.А., Храпов П.В. Численные методы аглербры и приближения функций: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Численные методы» / Кокотушкин Г.А., Федотов А.А., Храпов П.В. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 60 с.

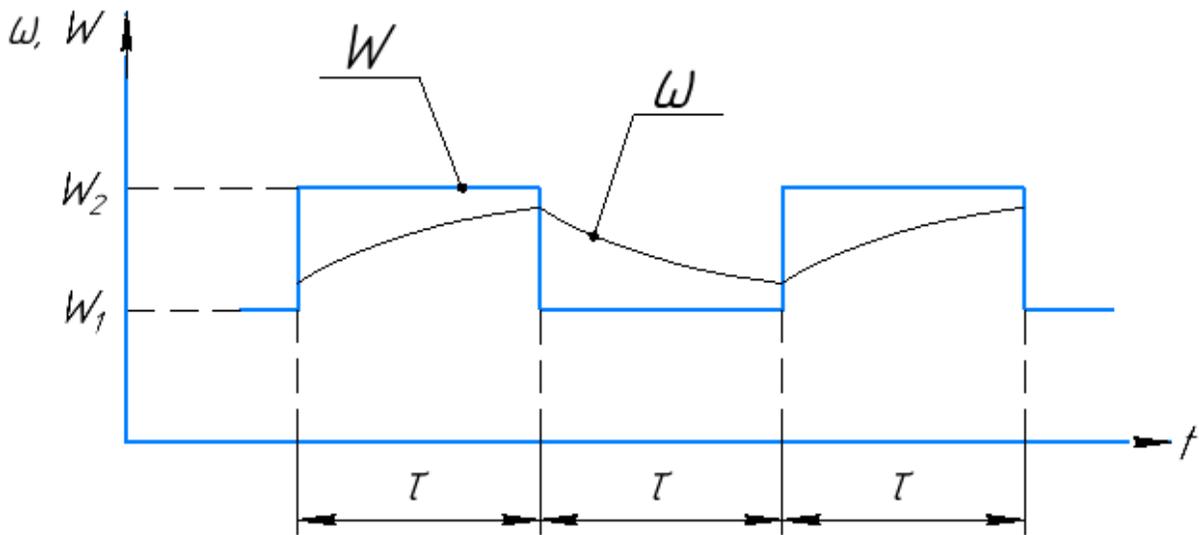


Рисунок 3 – Скорость вращения датчика скорости ветра при циклически изменяющейся скорости ветра: W – скорость ветра, ω – скорость вращения анемометра, τ – время, через которое скорость ветра меняет значение (W_1, W_2)

Figure 3 – Speed of wind rotation sensor at cyclically variable wind speed: W – wind speed, ω – anemometer speed, τ – time of wind speed change (W_1, W_2)

где α – угол поворота вертушки датчика;

l – произведение скорости ветра на время, то есть длина столба воздуха, прошедшего через анемометр;

J – момент инерции вращающихся частей датчика;

f – коэффициент трения, получаем выражение, описывающее движение датчика скорости ветра

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega e^{-\frac{Wt}{L}} \quad (4)$$

где ω_0 – начальная скорость вращения датчика;

$\Delta\omega$ – изменение установившейся скорости вращения датчика в ответ на изменение скорости ветра;

L – путь синхронизации – расстояние, которое пройдет столб воздуха за время, в течение которого разность между установившейся и текущей угловой скоростью датчика уменьшится в e раз.

Проинтегрировав функцию движения датчика скорости по времени и разделив на исследуемый промежуток времени, получили среднюю угловую скорость анемометра $\Delta\omega_{cp}$. Обозначим как ω среднюю арифметическую

скорость из синхронных скоростей, соответствующих скоростям ветра с графика рисунка 3. После преобразований получаем

$$\frac{\omega_{cp}}{\omega} = 1 + \frac{2\left(\frac{\Delta W}{W}\right) \frac{L}{W\tau} \left(1 - e^{-\frac{W_1\tau}{L}}\right) \left(1 - e^{-\frac{W_2\tau}{L}}\right)}{1 - \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 \frac{L}{W\tau} \frac{1 - e^{-\frac{W_1\tau}{L}}}{1 - e^{-\frac{W_2\tau}{L}}} e^{-\frac{W_2\tau}{L}}} \quad (5)$$

Второй член правой части всегда положителен, а следовательно, средняя скорость анемометра при пульсирующем ветре всегда больше синхронной скорости анемометра, соответствующей средней арифметической скорости ветра.

Подставив в (5) параметры выбранного датчика, а также параметры ветра, соответствующие самой неблагоприятной ситуации (коэффициент порывистости 1.4, средняя скорость ветра 20 м/с, период колебаний скорости ветра 10 с, продолжительность данного режима 2 мин), получили ошибку датчика $\Delta_{датчика} = 9,43\%$ (для АСЦ-3 $\Delta_{датчика} = 29,6\%$).

Таким образом, возможно определить ошибку $\Delta_{прогноза}$, которая находится как разница между допустимой ошибкой анемометра и ошибкой датчика $\Delta_{датчика}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа исследований динамики ветра была составлена таблица соответствия уровней определяемых параметров (скорости порыва, средней скорости и прогнозируемой средней скорости ветра) и сигналов, подаваемых оператору крана (таблица 1).

В качестве органов вывода использованы:

- цифровые табло: «Средняя скорость ветра», «Мгновенная скорость ветра»;

- световые индикаторы: «Стоп», «Опасно ветер», «Опасный прогноз», «Работа». На основе индикации составляется план действий крановщика (например, запрет выполнения следующего цикла подъёма груза).

- звуковой сигнал. Служит для привлечения внимания оператора крана к показаниям цифровых табло и световых индикаторов.

- реле. Использовано для подачи управляющего сигнала на включение сирены, установленной на рабочей площадке. Данное реле также может использоваться для записи о

превышении допустимой скорости ветра в регистратор параметров.

Зачастую одновременно удовлетворяются условия по нескольким параметрам (например, очевидно при превышении порога 100% превышает и порог 80%), поэтому то, какой сигнал будет активен и по какому условию он будет снят, определяется согласно приоритету, где 1 – наивысший приоритет, а 5 – наименьший (число приоритетов равно количеству типовых состояний прибора).

Далее следует рассмотреть параметр – задержка снятия сигнализации. Так как может возникнуть ветровая ситуация, при которой скорость колеблется около предельного значения, следует отключать сигнал не сразу после снижения скорости ветра ниже порогового значения активации режима. Иначе прибор будет подавать сигнал при каждом превышении с частотой колебания скорости ветра и мешать оператору (рисунок 4). Для каждого случая было определено своё значение величины задержки снятия сигнализации.

Таблица 1
Типы сигналов в зависимости от ветровой обстановки

Table 1
Wind-dependent signal types

Средняя скорость	Порыв	Сигнал прибора	Приоритет
	100%	«Стоп», непрерывная звуковая сигнализация, замыкается реле. Снятие через 30 сек после последнего $V_{\text{порыва}} = 100\%$	1
100%		«Стоп», непрерывная звуковая сигнализация, замыкается реле. Снятие через 2 мин после не превышения $V_{\text{ср}} = 95\%$	2
	90%	«Опасно ветер», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 30 с после снижения $V_{\text{порыва}}$ ниже 80%	3
80%		«Опасно ветер», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 1 мин после снижения $V_{\text{ср}}$ до 75%	4
100% через (2–5) мин		«Опасный прогноз», трёхкратный звуковой сигнал. Снятие индикации через 2 мин	5

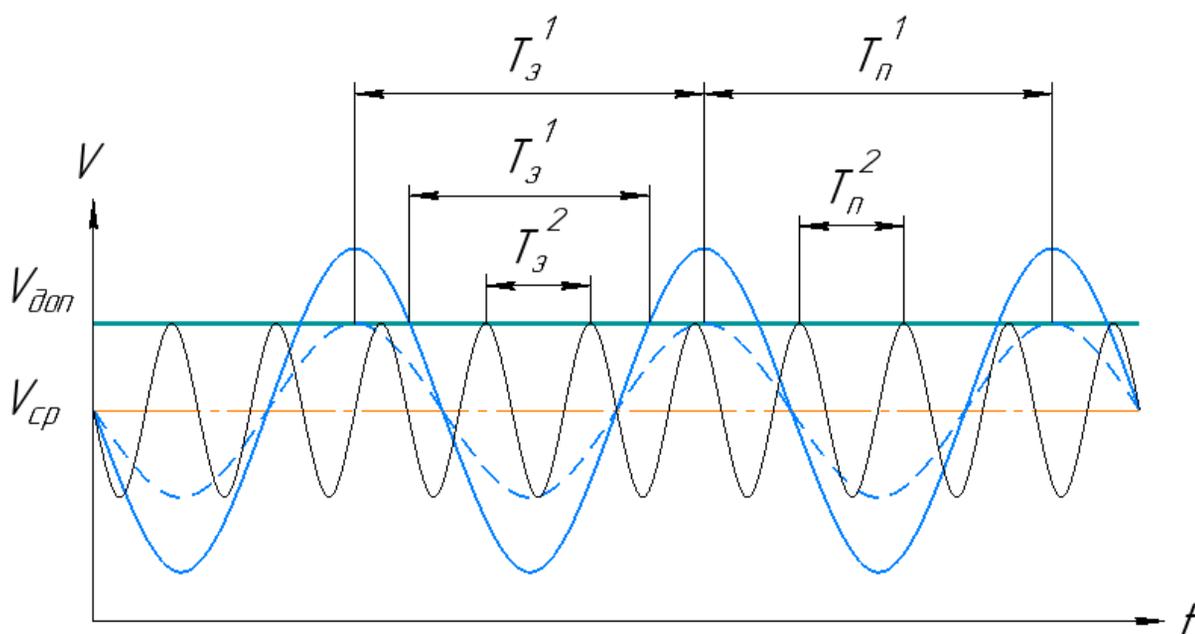


Рисунок 4 – Связь периода и амплитуды колебаний скорости ветра и задержки снятия сигнала: T_3 – время задержки (при которой сигнализация будет подаваться непрерывно), T_n – период колебаний, 1 – колебания с наибольшим периодом, 2 – колебания с наименьшим периодом, $V_{доп}$ – допустимая скорость ветра, $V_{ср}$ – средняя скорость ветра

Figure 4 – The relationship between the period and amplitude of the wind speed and the signal removal delay is as follows: T_3 – the delay time (at which the alarm will be continuously activated), T_n – the period of the oscillations, 1 – the period with the greatest period, 2 – the period of the oscillations, $V_{доп}$ – permissible wind speed, $V_{ср}$ – average wind speed

Обоснование принятых порогов и значений в описанных типовых случаях (см. таблицу 1):

Превышение по скорости порыва. Порыв достиг значения 100% от допустимой скорости. Согласно [16] необходимо включить сигнализацию, соответствующую режиму «Стоп». Предположим, что в данный момент действует устойчивый порывистый ветер. Значит мгновенная скорость ветра колеблется с периодом 5 – 30 сек [17].

Рассмотрим пограничный случай. Колебания скорости достигают максимума на уровне допустимой скорости. Тогда сигнал на запрет работы будет активироваться с частотой колебаний ветра. Следовательно, чтобы избежать многократного включения-выключения сигнализации (что усложнит работу оператора крана), устанавливаем задержку снятия сигнализации. Её величина должна быть не меньше наибольшего периода колебаний скорости ветра, то есть 30 сек [17]. Тогда при таком периоде к моменту снятия сигнализации уже сно-

ва достигнется порог срабатывания (и сигнал запрета работы прерываться не будет), а для колебаний большей частоты ещё раньше.

Превышение по средней скорости. Средняя скорость достигла 100%. Сигнализация «ОПАСНО» уже активирована, так как для достижения $V_{ср} = 100\%$ был превышен $V_{порыва} = 100\%$. Снятие сигнализации происходит через 2 мин после последнего снижения $V_{ср}$ до 95%. Если менее чем за 30 сек до отключения сигнализации реализуется случай 1, то отключение сигнализации осуществляется по его инструкции, как у случая с большим приоритетом.

Превышение предварительного порога по скорости порыва. Скорость порыва достигла $V_n = 90\%$. Включается индикация «Опасно ветер» и однократный звуковой сигнал (предупредительная сигнализация о повышении скорости ветра). Отключение индикации через 30 сек после снижения скорости порыва ниже 80%.

Превышение предварительного порога по средней скорости. Средняя скорость ветра достигла 80% от допустимой⁷. В [17] на основе наблюдений за скоростью ветра установлено, что наиболее вероятное отношение порыва к средней скорости ветра принимает значение 1,23...1,4. При достижении $V_{cp} = 80\%$ от допустимой скорости ожидаются порывы 98,4...112%. Это говорит о потенциально опасной ситуации. Следует включить световую индикацию «Опасно ветер» и подать однократный звуковой сигнал, чтобы привлечь внимание оператора крана к показаниям анемометра. Включение данного режима означает, что не следует поднимать груз с большой парусностью или осуществлять работы, предполагающие длительное удержание или перемещение груза. Отключение этого режима происходит через 2 мин после снижения V_{cp} до 75%.

Защита от шквалистого ветра (прогноз). Программно предусмотрено 3–5 переменных, в которых последовательно хранятся V_{cp} с интервалом в 2 мин. С помощью метода наименьших квадратов строится экстраполяционная функция. По найденной функции определяется предполагаемое значение скорости ветра на следующие 2–5 мин. Если оно превысит 100% от допустимой скорости ветра, то включается световая индикация «Опасный прогноз» и подаётся однократный звуковой сигнал, чтобы оператор крана обратил внимание на индикацию.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён анализ современных методик определения и прогнозирования скорости ветра. Определены необходимые параметры и интервалы их измерения для прогнозирования ветровой обстановки на подъёмных сооружениях. Установлены некоторые зависимости между этими параметрами.

Разработан алгоритм работы кранового анемометра. Описана функция осреднения порывов за $T_{порыва}$ и значения средней скорости за T_{cp} . Приведены необходимые устройства вывода информации прибора, которые будут снабжать оператора крана достаточной информацией. Составлена таблица состояний индикации в зависимости от ветровой обстановки, установленной на основе показаний скорости порывов, средней и прогнозируемой средней скорости ветра. Введён параметр времени задержки снятия сигнализации.

В дальнейшем следует провести оценку качества прогноза, полученного с использова-

нием различных экстраполяционных функций. Также необходимо проверить правильность назначения времени снятия сигнализации и уровней срабатывания.

На данный момент предприятием ЗАО ИТЦ «КРОС» изготовлен опытный образец анемометра, использующего описанные в данной статье принципы. Прибор соответствует всем требованиям нормативно-технической документации. Дальнейшая работа по совершенствованию алгоритма его работы позволит ещё больше повысить безопасность технологических процессов, осуществляемых с использованием подъёмных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инденбаум А.И., Котельников В.С., Жуков В.Г. Основные причины аварий башенных кранов и меры для их устранения // Безопасность труда в промышленности. 2005. №3. С. 22-29.
2. Антипин В.А., Елизарьева Е.Н. Анализ опасностей при эксплуатации башенного крана // Актуальные проблемы социального, экономического и информационного развития современного общества. 2016. С. 21-23.
3. Гнибеда. И., Боянов К., Карманов С. Нарушение условий эксплуатации башенных кранов // Технадзор. 2015. №11. С. 159-160.
4. Кузнецов Ф.А., Сладкова Л.А. Способ обеспечения устойчивости башенных кранов на основе исключения резонанса частот крана и ветровых порывов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. 2019. С. 115-119.
5. Ерофеев Н.И., Подобед В.А. Работа подъёмных кранов при сильном ветре // Безопасность труда в промышленности. 1977. №3. С. 37-38.
6. Тимаков В.И., Тимаков М.В. Состояние промышленной безопасности при эксплуатации грузоподъёмных кранов на объектах, подконтрольных Ростехнадзору // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: техника и технологии. 2017. №1. С. 27-41.
7. Ищенко А.Р., Евдокимова М.С. Обеспечение устойчивости свободно стоящих башенных кранов при ветровом нагружении // Труды университета. 2019. №3. С. 153-157.
8. Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // Вестник МГСУ. 2017. №12. С. 1342-1351.
9. Сорокин П.А., Мишин А.В., Хряков К.С. Разработка и сравнение систем контроля устойчивости башенных кранов. Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2.
10. Сорокин П.А., Мишин А.В. Система безопасности башенных кранов с автоматическим контролем их устойчивости // Подъёмно-транспортное дело. 2017. №2–3. С. 20-21.
11. Сорокин П.А., Мишин А.В. Нейросетевой алгоритм системы автоматического контроля устойчивости башенных кранов // Автоматизация и современные технологии. 2014. №4. С. 7-12.

12. Сорокин П.А., Мишин А.В. Система контроля устойчивости башенных кранов от опрокидывания // Известия тульского государственного университета // Технические науки. 2013. №7–2. С. 325-332.

13. Обыденнов В.А. Устойчивость стационарных башенных кранов в условиях ветрового нагружения. Тула, 2010. 18 с.

14. Моренко К.С. Применение цепей Маркова при прогнозировании динамики скорости ветра // Вестник аграрной науки Дона. 2015. 4 (32).

15. Гуррера Д. Стохастическое моделирование прогнозирования скорости ветра. Нижний Новгород, 2012. 16 с.

16. Подобед В.А., Подобед Н.Е. Предупреждение риска при эксплуатации кранов при ветровых нагрузках в морских портах // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. №3. С. 531-533.

17. Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 2. С. 318-331.

18. Подобед В.А. Теоретические исследования основных показателей работы порталного крана «Альбрехт» при динамическом воздействии ветра // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. №3. С. 522-530.

19. Уфимцев Е.М. Временной анализ физически и конструктивно нелинейных колебаний ферменных конструкций при действии импульсной нагрузки // Строительство и экология: теория, практика, инновации. 2015. Ч.1. С. 102-106.

20. Подобед В.А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках. Москва, 2007. 47с.

21. Аджиев А.Х., Петренко В.А., Корнилов Ю.В. Прогнозы климатических характеристик для инженерно-геологических изысканий на зимний период 2014 года в Сочи // Геориск. 2010. №3. С. 58-63.

22. Подобед В.А. Работа портовых кранов при ветровых нагрузках // Морской флот. 2006. № 6. С. 68-70.

23. Подобед Н.Е., Подобед В.А. Безопасность производства перегрузочных работ кранами в морских портах при повышенных ветровых нагрузках // Вестник мурманского государственного технического университета. 2011. №3. С. 496-498.

24. Меньшиков В.И., Подобед Н.Е., Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на механизмы передвижения порталных кранов с прямой стрелой // Вестник мурманского государственного технического университета. 2009. № 1. С. 27-23.

25. Новицкий М.А., Хачатурова Л.М., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Максимальные пульсации направления ветра за ограниченные промежутки времени на высотах до 300 м по данным наблюдений на высотной мачте // Метеорология и гидрология. 2007. №3. С. 33-42.

REFERENCES

1. Indenbaum A.I., Kotel'nikov V.S., Zhukov V.G. Osnovnyye prichiny avariyy bashennykh kranov i mery dlya ikh ustraneniya [The main causes of accidents of tower cranes and measures for their elimination]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2005; 3: 22-29. (in Russian)

2. Antipin V.A., Yelizar'yeva Ye.N. Analiz opasnostey pri ekspluatatsii bashennogo kрана [Analysis of hazards during the operation of a tower crane]. *Aktual'nyye problemy sotsial'nogo, ekonomicheskogo i informatsionnogo razvitiya sovremennogo obshchestva*. 2016. 21-23. (in Russian)

3. Gnibeda I., Boyanov K., Karmanov S. Narusheniye usloviy ekspluatatsii bashennykh kranov [Violation of the operating conditions of tower cranes]. *Tekhnadzor*. 2015; 11: 159-160.

4. Kuznetsov F.A., Sladkova L.A. Sposob obespecheniya ustoychivosti bashennykh kranov na osnove isklyucheniya rezonansa chastot kрана i vetrovykh poryvov [A method of ensuring the stability of tower cranes on the basis of eliminating the resonance of the crane frequencies and wind gusts]. *Nazemnyye transportno-tekhnologicheskiye komplekсы i sredstva*. 2019. 115-119.

5. Yerofeyev N.I., Podobed V.A. Rabota pod'yomnykh kranov pri sil'nom vetre [The work of cranes in strong winds]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 1977; 3: 37-38.

6. Timakov V.I., Timakov M.V. Sostoyaniye promyshlennoy bezopasnosti pri ekspluatatsii gruzopod'yomnykh kranov na ob'yektakh, podkontrol'nykh Rostekhnadzoru [The state of industrial safety during the operation of cranes at facilities controlled by Rostekhnadzor]. *Izvestiya Yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii*. 2017; 1: 27-41.

7. Ishchenko A.R., Yevdokimova M.S. Obespecheniye ustoychivosti svobodno stoyashchikh bashennykh kranov pri vetrovom nagruzenii [Ensuring the stability of free-standing tower cranes under wind loading]. *Trudy universiteta. Proceedings of the University*. 2019; 3: 153-157.

8. Sinel'shchikov A.V., Dzhal'mukhambetov A.I. Razvitiye metodov rascheta ustoychivosti bashennykh kranov [Development of methods for calculating the stability of tower cranes]. *Vestnik MGSU*, 2017; 12: 1342-1351.

9. Sorokin P.A., Mishin A.V., Khryakov K.S. Razrabotka i sravneniye sistem kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov [Development and comparison of tower crane stability control systems]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*. 2016; 11(2).

10. Sorokin P.A., Mishin A.V. Sistema bezopasnosti bashennykh kranov s avtomaticheskim kontrolem ikh ustoychivosti [Security system of tower cranes with automatic control of their stability]. *Pod'yemno-transportnoye delo*. 2017; 2-3: 20-21.

11. Sorokin P.A., Mishin A.V. Neyrosetevoy algoritm sistemy avtomaticheskogo kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov [Neural network algorithm for the automatic stability control system for tower cranes]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*. 2014; 4: 7-12.

12. Sorokin P.A., Mishin A.V. Sistema kontrolya ustoychivosti bashennykh kranov ot oprokidyvaniya [System for monitoring the stability of tower cranes against overturning]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*. 2013; 2: pp. 325-332.

13. Obydenov V.A. Ustoychivost' statsionarnykh bashennykh kranov v usloviyakh vetrovogonagruzheniya [Stability of stationary tower cranes in the conditions of wind loading]. Tula, 2010. 18 p.

14. Morenko K.S. Primeneniye tsepey Markova pri prognozirovaniy dinamiki skorosti vetra [Application of Markov Chains for Predicting Wind Speed Dynamics]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2015; 4(32).

15. Gurrera D. Stokhasticheskoye modelirovaniye prognozirovaniya skorosti vetra [Stochastic modeling of forecasting wind speed]. Nizhniy Novgorod, 2012, 16 p.

16. Podobed V.A., Podobed N.Ye. Preduprezhdeniye riska pri ekspluatatsii kranov pri vetrovykh nagruzkakh v morskikh portakh [Risk prevention during operation of cranes under wind loads in seaports]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 3: 531-533.

17. Podobed V.A. Matematicheskoye modelirovaniye vetrovykh nagruzok na portovyye portal'nyye krany [Mathematical modeling of wind loads on port gantry cranes]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 9(2): 318-331.

18. Podobed V.A. Teoreticheskkiye issledovaniya osnovnykh pokazateley raboty portal'nogo krana "Al'brekht" pri dinamicheskom vozdeystvii vetra [Theoretical studies of the main performance indicators of the "Albrecht" gantry crane under dynamic influence of the wind]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006; 3: 522-530.

19. Ufimtsev Ye.M. Vremennoy analiz fizicheskoy i konstruktivno nelineynykh kolebaniy fermennykh konstruksiy pri deystvii impul'snoy nagruzki. Chast' 1: matematicheskkiye modeli vremennogo analiza nelineynykh kolebaniy [Time analysis of physically and structurally nonlinear vibrations of truss structures under the action of a pulsed load. Part 1: mathematical models of temporal analysis of nonlinear oscillations]. *Stroitel'stvo i ekologiya: teoriya, praktika, innovatsii*, 2015, pp. 102-106.

20. Podobed V.A. Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya portovykh kranov pri vetrovykh nagruzkakh [Increasing the efficiency of using harbor cranes under wind loads]. Moscow, 2007. 47 p.

21. Adzhiyev A.KH., Petrenko V.A., Kornilov YU.V. Prognozy klimaticheskikh kharakteristik dlya inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy na zimniy

period 2014 goda v Sochi [Predictions of climatic characteristics for engineering and geological surveys for the winter period of 2014 in Sochi]. *Georisk*. 2010; 3: 58-63.

22. Podobed V.A. Rabota portovykh kranov pri vetrovykh nagruzkakh [Operation of port cranes under wind loads]. *Morskoy flot*. 2006; 6: 68-70.

23. Podobed N.Ye., Podobed V.A. Bezopasnost' proizvodstva peregruzochnykh rabot kranami v morskikh portakh pri povyshennykh vetrovykh nagruzkakh [Safety of handling operations by cranes in seaports at increased wind loads]. *Vestnik murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011; 3: 496-498.

24. Men'shikov V.I., Podobed N.Ye., Podobed V.A. Matematicheskoye modelirovaniye vetrovykh nagruzok na mekhanizmy peredvizheniya portal'nykh kranov s pryamoy streloy [Mathematical modeling of wind loads on the mechanisms of movement of portal cranes with a straight boom]. *Vestnik murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009; 1: 27-23.

25. Novitskiy M.A., Khachaturova L.M., Kulizhnikova L.K., Matskevich M.K. Maksimal'nyye pul'satsii napravleniya vetra za ogranichennyye promezhutki vremeni na vysotakh do 300 m po dannym nablyudeniya na vysotnoy machte [Maximum pulsations of the wind direction for limited time intervals at heights of up to 300 m according to observations on a high-altitude mast]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2007; 3: 33-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рощин Виталий Андреевич – инженер ЗАО ИТЦ «КРОС» (г. Ивантеевка, e-mail: roshchinva@mail.ru).

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, e-mail: rk4@bmstu.ru).

Назаров Александр Николаевич – аспирант 1-го курса кафедры «Подъемно-транспортные системы» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, e-mail: alexnazavr@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaly A. Roshchin – Engineer of the KROS Engineering and Technical Center, Ivanteevka, Russia (e-mail: roshchinva@mail.ru).

Sergey D. Ivanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department, N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia (e-mail: rk4@bmstu.ru).

Alexander Nazarov – 1-year postgraduate, the Hoisting and Transport Systems Department N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia (e-mail: alexnazavr@yandex.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

С.Д. Иванов – теоретическое обоснование работы, общее руководство, анализ полученных результатов.

А.Н. Назаров – анализ нормативной документации, математическое моделирование ветрового потока.

В.А. Рощин – анализ результатов моделирования, разработка системы сигналов анемометра.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

S.D. Ivanov – theoretical justification of the research, general management, analysis of the results.

A.N. Nazarov – analysis of regulatory documents, mathematical modeling of the wind flow.

V.A. Roshchin – analysis of the modeling results, development of anemometer signal system.

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ НИЖНЕГО НОЖА КОВША АГРЕГАТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО «ЯТУ»,
г. Ярославль, Россия
nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения проблемы ускорения строительства автодорог, повышения их качества целесообразно использовать агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Основными рабочими органами этого агрегата являются ковши, которые отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижний нож отрезает слой грунта снизу, правый нож – сбоку, а консольный нож частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. В частности, представляет теоретический и практический интерес анализ взаимодействия с грунтом нижнего ножа ковша агрегата непрерывного действия. Для этого нижний нож разделён на элементы и проведён анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Последовательное воздействие на грунт многих нижних ножей, в пределах ширины захвата агрегата, заменено воздействием на грунт одного условного нижнего ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного нижнего ножа с грунтом названы условными силами.

Методика исследования. Приведена методика расчёта затрат энергии при внедрении нижнего ножа в грунт. В общем случае при внедрении нижнего ножа в грунт существуют затраты энергии на отделение пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о поверхность, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость. Общие затраты энергии при взаимодействии нижнего ножа с грунтом объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии. Приведена методика расчёта горизонтальной продольной силы, необходимой для перемещения нижнего ножа.

Результаты. На основе разработанной методики рассчитаны затраты энергии при внедрении нижнего ножа на отделение пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость. Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа равны нулю, так как грунт перелетает через неё. Определены общие затраты энергии при взаимодействии нижнего ножа с грунтом объёмом один кубический метр. Определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа.

Заключение. В результате выполненных расчётов энергия, необходимая для резания грунта нижними ножами, около 5 кДж/куб. м, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа, – 16 Н. Для определения общих затрат энергии на перемещение ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов ковша.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильная дорога, агрегат непрерывного действия, грунт, нижний нож, затраты энергии, горизонтальная продольная сила.

Поступила 28.09.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: Николаев В.А. Анализ взаимодействия с грунтом нижнего ножа ковша агрегата для формирования подстилающего слоя автодороги. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

INTERACTION ANALYSIS OF BUCKET BOTTOM KNIFE WITH SOIL TO BUILD UP SUBBASE

Vladimir A. Nikolaev

Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia
nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of accelerating the construction of roads, improving their quality, it is advisable to use a continuous action unit to form a underlying layer. The main working elements of this unit are buckets, which cut off the soil layer from below and side. At the same time, the bottom knife cuts off the ground layer from below, the right knife - on the side, and the console knife partially cuts the top layer of soil from below for the next bucket. In particular, the analysis of interaction with the ground of the bottom knife of the continuous action unit is of theoretical and practical interest. To do this, the lower knife is divided into elements and the interaction of these elements with the soil is analyzed. The consistent impact on the soil of many bottom knives, within the width of the grip of the unit, is replaced by the impact on the ground of one conventional bottom knife at a distance necessary for the development of one cubic meter of soil. The forces of interaction of the conventional bottom knife with the soil are called conditional forces.

The method of research. The method of calculating energy costs when introducing the bottom knife into the ground is presented. In general, when introducing the bottom knife in the ground, there are energy costs: to separate the soil, to overcome the friction of the ground on the edge of the blade, to overcome the pressure of the ground on the face, to the rise of the ground, to the vertical acceleration of the ground by the phase, to overcome the friction of the ground on the face, to overcome the friction of the ground on the surface, to overcome the friction of the ground on the lower plane. The total energy costs of interacting with a one cubic metre soil are derived from the addition of private energy costs. The method of calculating the horizontal longitudinal force needed to move the bottom knife is given.

Results. On the basis of the developed method, energy costs are calculated in the introduction of the lower knife: on the separation of the soil, on overcoming the friction of the ground on the edge of the blade, on overcoming the pressure of the ground on the face, on the rise of the ground, on the vertical acceleration of the ground face, on overcoming the friction of the ground on the fascia, to overcome the friction of the ground on the lower plane. Energy costs to overcome the friction of the ground on the surface of the bottom knife are zero, as the soil flies over it. The total energy costs of the bottom knife interact with the soil of one cubic meter. The horizontal long-lived force needed to move the bottom knife has been determined.

Conclusion. As a result of the calculations: the energy needed to cut the ground with the bottom knives, about 5 kJ/cube m., horizontal longitudinal force needed to move the lower knife - 16 N. To determine the total energy costs of moving the boiler unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road, you need to analyze the interaction with the soil of other elements of the bucket.

KEYWORDS: Road, continuous action unit, ground, bottom knife, energy costs, horizontal longitudinal force.

Submitted 28.09.20, revised 23.10.2020.

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: Vladimir A. Nikolayev. Interaction analysis of bucket bottom knife with soil to build up subbase. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

© Nikolaev V.A.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) определены затраты энергии на отделение нижним ножом пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия нижнего ножа, на преодоление напора грунта на его фаску, на подъём грунта, на ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость нижнего ножа;

2) определены общие затраты энергии при взаимодействии нижнего ножа с грунтом в период разработки грунта объёмом один кубический метр;

3) определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя [1, 2, 3] предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. Основными рабочими органами этого агрегата являются ковши, которые отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижний нож отрезает слой грунта снизу, правый нож – сбоку, а консольный нож частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. Геометрические параметры ковша получены из конструктивной компоновки агрегата [1]. Проанализировано взаимодействие консольного ножа и правого ножа с грунтом [2, 3].

Чтобы определить общие затраты энергии на перемещение кошей агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги, нужно выполнить анализ взаимодействия с грунтом нижнего ножа ковша. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27], но, используя их, сложно оценить частные затраты энергии при работе каждого элемента рабочего органа. Поэтому разделим нижний нож на элементы и проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Воспользуемся способом, который состоит в выявлении условных сил и затрат энергии при разработке одного кубического метра грунта. Заменяем последовательное воздействие на грунт многих нижних ножей, в пределах ширины захвата агрегата, воздействи-

ем на грунт одного условного нижнего ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного нижнего ножа с грунтом назовём условными силами. Установлено [2], что резание грунта лезвием происходит микроотрывами, поэтому для определения мгновенных значений сил выявленные условные силы приведём к расстоянию одного микроотрыва.

Методика расчёта параметров резания грунта горизонтальным лезвием зависит от того, влияет напор срезанного ранее грунта на процесс резания или не влияет. Так, например, на подрезаемый снизу грунт ножом бульдозера или лемехом плуга воздействует подрезанный ранее грунт, который перемещается по поверхности отвала бульдозера или плуга. Игнорирование воздействия подрезанного ранее грунта на процесс его резания такими техническими средствами приведёт к искажению результатов расчёта.

Грунт, подрезанный нижним ножом ковша агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги, постепенно заполняет ковш. При заполнении ковша подрезанный разрыхлённый грунт не оказывает существенного воздействия на процесс резания. Лишь в конце заполнения ковша напор срезанного ранее грунта, заполняющего ковш, начинает влиять на процесс резания. Однако этим влиянием можно пренебречь, поскольку ёмкость ковша выбрана такой, что грунт в ковше при его заполнении располагался свободно, без существенного уплотнения.

Лезвие «Н» нижнего ножа (рисунок 1) направлено под углом 10° к планке крепления ковша, то есть под углом 80° к направлению его перемещения. Нижний нож имеет правый выступ *ПВ*, левый выступ *ЛВ* и задний выступ *ЗВ*, посредством которых его фиксируют в корпусе ковша. Приваренный к нижнему ножу прижим служит для его установки в корпусе ковша, а также фиксирования консольного ножа.

Правая сторона нижнего ножа осуществляет свободное резание, так как слой почвы справа отрезан ранее правым ножом. Резание происходит с незначительным скольжением, поскольку лезвие «Н» расположено под углом 80° к направлению перемещения ковша. Угол заточки лезвия нижнего ножа $i = 19^\circ$, заточка односторонняя, с верхней фаской. С учётом трансформации угол заострения лезвия нижнего ножа $\alpha_{пр} = i_{тр} = 18,25^\circ$.

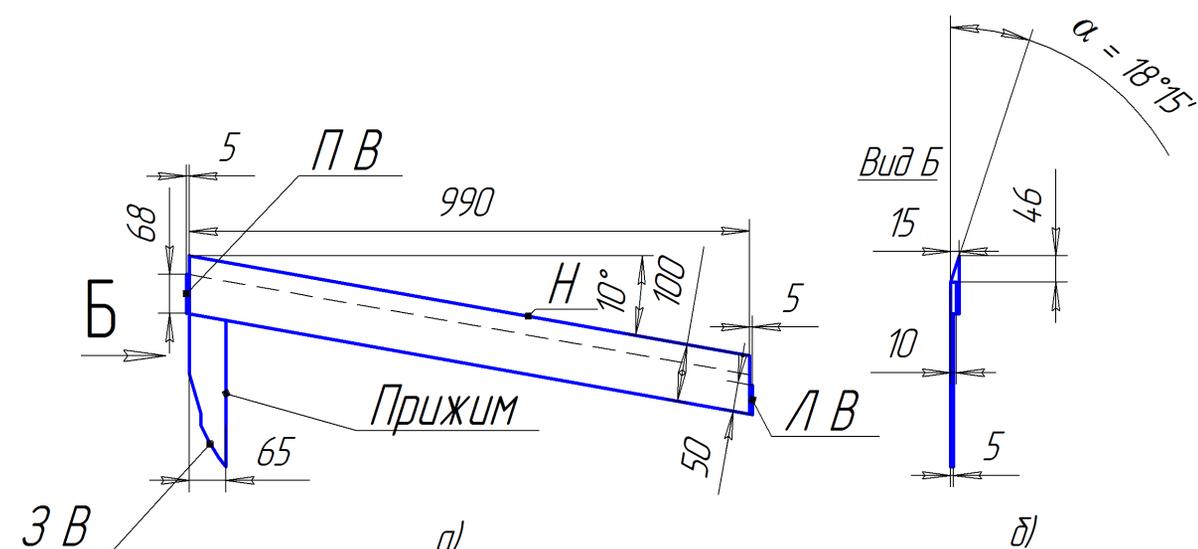


Рисунок 1 – Нижний нож с прижимом: а– вид снизу; б – вид Б

Figure 1 – Bottom knife with a press: (a) view from below; b) View B

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Правая сторона нижнего лезвия «Н» подрезает снизу пласт грунта, который уже подрезан консольным ножом предыдущего ковша. Остальная часть нижнего лезвия зачищает поверхность подстилающего слоя автодороги. Величины сил и затраты энергии на зачистку поверхности подстилающего слоя автодороги зависят от многих трудноучитываемых факторов, поэтому их вычислить сложно. Примем все нагрузки на левую сторону нижнего лезвия равным нагрузкам на правую сторону. Поэтому величины сил и затраты энергии, вычисленные для правой стороны нижнего лезвия, умножим на два.

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

- на отделение пласта грунта;
- на преодоление трения грунта о кромку лезвия;
- на преодоление напора грунта на фаску;
- на подъем грунта;
- на вертикальное ускорение грунта фаской;
- на преодоление трения грунта о фаску;
- на преодоление трения грунта о поверхность;
- на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость.

Энергия, необходимая для отделения пласта грунта нижним ножом

Заменим дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 м³ грунта. Предел прочности грунта на растяжение σ_p^B . Ширина отрыва пласта правой стороной нижнего лезвия b_H [2]. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объемом один кубический метр равна s_K . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа $S_{отрн} = b_H s_K$. Общая сила воздействия правой стороны передней кромки лезвия одного условного нижнего ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{отрпсн} = \sigma_p^B S_{отрн}. \quad (1)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{отр} = 1$ мм. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объемом один кубический метр нижним условным ножом

$$u_{отрн} = F_{отрпсн} h_{отр}. \quad (2)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия нижнего ножа

Построим пространственную модель нижнего ножа (рисунок 2).

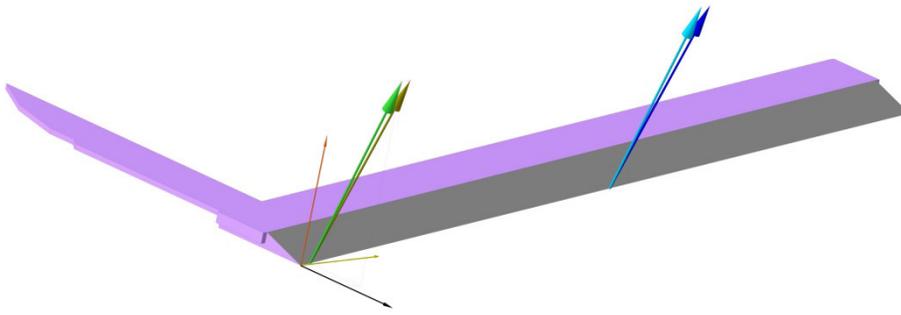


Рисунок 2 – Схема суммарных сил воздействия кромки нижнего ножа на грунт

Figure 2 – Scheme of total forces of impact of the edge of the bottom knife on the ground

Полученную силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим к нижнему ножу справа на расстоянии $\frac{b_n}{2}$. Силу воздействия остальной кромки лезвия условного нижнего ножа приложим посередине остальной части кромки лезвия. Обе силы направим перпендикулярно плоскости фаски нижнего ножа. Спроецируем обе силы на оси x (чёрная), y (жёлтая), z (оранжевая), определим величины проекций $F_{прnx}$, $F_{прny}$, $F_{прnz}$ и их соотношение к силе воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа. При этом условная сила отрыва пласта кромкой лезвия правой стороны нижнего ножа и левой стороны нижнего ножа $F_{отрпсн} = F_{отрлсн} = F_{отрн}$.

Спроецируем силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа $F_{отрпсн}$ и силу воздействия левой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа $F_{отрлсн}$ (вектор травяного цвета, синий вектор) на продольную вертикальную плоскость. Проекция нормальной реакции кромки нижнего ножа на воздействие грунта из рисунка 2, соответственно, правой и левой её стороны (зелёный вектор, голубой вектор) $N_{\Sigma крпсн}$, $N_{\Sigma крлсн}$. Обе проекции нормальных сил приведём к расстоянию микроотрыва $l_{отр}$:

$$N_{крпсн} = N_{\Sigma крпсн} \frac{l_{отр}}{s_k}. \quad (3)$$

Примем коэффициент трения между сталью и грунтом $f_{с-г}$. Сила трения правой стороны нижнего ножа

$$F_{ткрпсн} = f_{с-г} N_{крпсн}. \quad (4)$$

Сила трения левой стороны нижнего ножа $F_{ткрлсн} = F_{ткрпсн}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромку нижнего ножа

$$u_{ткрн} = 2F_{ткрпсн} s_k. \quad (5)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа

На основании относительности движения допустим, что не нижний нож преодолевает сопротивление грунта, а грунт набегаёт на нижний нож со скоростью v_k . Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Максимальный срезаемый слой грунта $h_{сл}$. Толщина нижнего ножа h_n . При таких параметрах срезаемого слоя [2] известен объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}}$, масса грунта, воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $m_{г-к}$ и мгновенная сила $F_{г-н}$ набегающего грунта $F_{г-н}$. Время перемещения ковша на расстояние s_k при разработке грунта объёмом один кубический метр τ_k . Отсюда суммарная сила воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$F_{\Sigma г-н} = F_{г-н} \tau_k. \quad (6)$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа

$$u_{г-н} = F_{\Sigma г-н} v_k. \quad (7)$$

Затраты энергии на подъём грунта нижним ножом

Так как пласт грунта отделён от его массива консольным ножом, то энергия, необходимая для подъёма грунта, является потенциальной энергией подъёма груза на высоту, равную толщине нижнего ножа h_n . Допустим, плотность грунта ρ . Масса грунта, поднимаемого нижним ножом,

$$m_{\text{под}} = \rho V_{\text{под}}. \quad (8)$$

Условная сила подъёма грунта нижним ножом

$$F_{\text{подн}} = m_{\text{под}} g. \quad (9)$$

Энергия, необходимая для подъёма грунта нижним ножом,

$$u_{\text{подн}} = m_{\text{под}} g h_n. \quad (10)$$

Придадим направление условной силе $F_{\text{подн}}$ перпендикулярно плоскости верхней фаски нижнего ножа. Из рисунка 2 были вычислены проекции силы $F_{\text{отрпсн}}$. По аналогии определим проекции на оси x , y , z условной силы $F_{\text{подн}}$.

Затраты энергии на вертикальное ускорение грунта фаской нижнего ножа

Фаска нижнего ножа не только поднимает грунт, расположенный над нижним ножом, но и придаёт ему вертикальное ускорение. Масса грунта, ускоряемого нижним ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_y = m_{\text{под}}$. Условная сила для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом

$$F_{\text{ун}} = m_y a_{\text{верт}}. \quad (11)$$

Начальная вертикальная скорость грунта равна нулю: $v_{\text{начверт}} = 0$. Скорость ковша v_k направлена горизонтально. Угол заострения лезвия нижнего ножа $\alpha_{\text{пр}} = i_{\text{тр}} = 18,25^\circ$. Конечная вертикальная скорость грунта

$$v_{\text{конверт}} = v_k \tan \alpha_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Горизонтальная проекция фаски нижнего ножа $46\text{мм} = 0,046\text{м}$ (рисунок 3). Время перемещения консольного ножа по грунту на это расстояние

$$\tau_{\phi} = \frac{0,046}{v_k}. \quad (13)$$

Вертикальное ускорение грунта

$$a_{\text{верт}} = \frac{v_{\text{конверт}} - v_{\text{начверт}}}{\tau_{\phi}}. \quad (14)$$

Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом определим по формуле (11).

Энергия, необходимая для вертикального ускорения грунта нижним ножом,

$$u_{\text{ун}} = \frac{m_y v_{\text{конверт}}^2}{2}. \quad (15)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о фаску нижнего ножа

На рисунке 3 условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа $F_{\Sigma\Gamma-n}$, направим по ходу ножа. Нанесём горизонтальную и вертикальную проекции условной силы $F_{\text{подн}}$ на продольно-вертикальную плоскость $F_{\text{поднх}}$ и $F_{\text{поднз}}$. Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом $F_{\text{ун}}$ направим вертикально. Сложим эти силы и определим равнодействующую. Затем равнодействующую спроецируем на нормаль к фаске и определим нормальную реакцию фаски на воздействие грунта. Из рисунка совокупная нормальная реакция фаски нижнего ножа $N_{\Sigma\text{фн}}$. Приведенная нормальная реакция фаски нижнего ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$

$$N_{\text{фн}} = N_{\Sigma\text{фн}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (16)$$

Сила трения грунта о фаску нижнего ножа

$$F_{\text{тфн}} = f_{c-\Gamma} N_{\text{фн}}. \quad (17)$$

Энергия на преодоление трения грунта о фаску нижнего ножа

$$u_{\text{тфн}} = F_{\text{тфн}} s_k. \quad (18)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа

Слой грунта от воздействия фаски нижнего ножа приобретает вертикальное ускорение $a_{\text{верт}} = 20,36 \text{ м/с}^2$. Определим параметры полёта пласта грунта. Представим частицу грунта материальной точкой, пущенной с фаски нижнего ножа под углом α к горизонту. Из уравнения

$$g\tau_d^2 - 2v_{\text{конверт}}\tau_d = 0 \rightarrow g\tau_d - 2v_{\text{конверт}} = 0$$

определим время полёта частицы грунта, в течение которого она опустилась бы до уровня поверхности нижнего ножа:

$$\tau_d = \frac{2v_{\text{конверт}}}{g}; \tau_d = \frac{2 \cdot 0,556}{9,8} = 0,113 \text{ с.}$$

За это время нижний нож преодолет расстояние

$$s_d = v_k \tau_d; s_d = 1,686 \cdot 0,113 \approx 0,19 \text{ м} = 190 \text{ мм.}$$

Из рисунка 3 длина поверхности нижнего ножа равна 54,5 мм. Поэтому грунт перелетит через нижний нож. Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа равны нулю.

Энергия, необходимая для преодоления трения грунта о нижнюю плоскость нижнего ножа, суммарные затраты энергии на перемещение нижнего ножа

Сложив все вертикальные силы: $F_{\text{прнз}}$, $F_{\text{поднз}}$, $F_{\text{ун}}$, определим совокупную вертикальную равнодействующую силу $F_{\Sigma \text{нз}}$. Приведём вертикальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{нз}} = F_{\Sigma \text{нз}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (19)$$

Кроме того, силу $F_{\text{тфн}}$ трения грунта о фаску нижнего ножа следует разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие:

$$F_{\text{тфнх}} = F_{\text{тфн}} \cos 18,25^\circ; \quad (20)$$

$$F_{\text{тфнз}} = F_{\text{тфн}} \sin 18,25^\circ. \quad (21)$$

Нормальная реакция нижней плоскости нижнего ножа

$$N_{\text{нпн}} = F_{\text{нз}} + F_{\text{тфнз}}. \quad (22)$$

Сила трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт

$$F_{\text{тнпн}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{нпн}}. \quad (23)$$

Энергия на преодоление трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт

$$u_{\text{тнпн}} = F_{\text{тнпн}} s_k. \quad (24)$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижним ножом:

$$u_n = u_{\text{отрн}} + u_{\text{ткрн}} + u_{\text{г-н}} + u_{\text{подн}} + u_{\text{ун}} + u_{\text{тфн}} + u_{\text{тнпн}}. \quad (25)$$

Сложив условные поперечные силы $F_{\text{прну}}$ и $F_{\text{подну}}$, определим суммарную условную поперечную силу $F_{\Sigma \text{ну}}$. Приведём условную поперечную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{ну}} = F_{\Sigma \text{ну}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (26)$$

Сложив все условные горизонтальные продольные силы $F_{\text{прнх}}$, $F_{\Sigma \text{г-н}}$, $F_{\text{поднх}}$, определим суммарную условную горизонтальную продольную силу $F_{\Sigma \text{нх}}$. Приведём суммарную условную горизонтальную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{нх}} = F_{\Sigma \text{нх}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (27)$$

Кроме того, имеются горизонтальные силы: сила $F_{\text{ткрпсн}}$ трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа, сила $F_{\text{ткрлсн}}$ трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфнх}}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{тнпн}}$ трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа,

$$F_{\Sigma \text{нх}} = F_{\text{нх}} + 2F_{\text{ткрпсн}} + F_{\text{тфнх}} + F_{\text{тнпн}}; \quad (28)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [1]: ширина слоя грунта, отрезаемого правым ножом $\delta = 30 \text{ мм}$, максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{\text{сл}} = 0,25 \text{ м}$, скорость ковша $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние [2] $s_k = 133 \text{ м}^3$. Время перемещения ковша на расстояние s_k $\tau_k = 78,885 \text{ с/м}^3$. Допустим, плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$.

Ширина отрыва пласта правой стороной нижнего лезвия $b_n = \delta = 30 \text{ мм}$ [2]. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна s_k . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа $S_{\text{отрн}} \approx 4000000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Правая сторона нижнего лезвия «Н» подрезает снизу пласт грунта, который уже подрезан консольным ножом предыдущего ковша, поэтому прием предел прочности грунта на растяжение $\sigma_p^B = 0,01 \text{ МПа}$. Сила воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа,

необходимая для преодоления сцепления грунта, (1):

$$F_{\text{отрпсн}} = 0,01 \cdot 4000000 = 40000 \text{ Н/м}^3; F_{\text{отрлсн}} = F_{\text{отрпсн}}$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{\text{отр}} = 1 \text{ мм}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр нижним условным ножом (2):

$$u_{\text{отрн}} = 2 \cdot 40000 \cdot 0,001 = 80 \text{ Дж/м}^3.$$

Построим пространственную модель нижнего ножа (см. рисунок 2). Полученную силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим к нижнему ножу справа на расстоянии $\frac{b_n}{2}$ от правого края лезвия. Силу воздействия левой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим посередине остальной части передней кромки лезвия. Обе силы направим перпендикулярно плоскости фаски нижнего ножа. Спроецируем обе силы на оси. Величины проекций из рисунка 2:

$$F_{\text{прнх}} = 12458 \text{ Н/м}^3, F_{\text{прну}} = 2218 \text{ Н/м}^3, F_{\text{прнз}} = 37956 \text{ Н/м}^3; \\ F_{\text{прнх}} = 0,31F_{\text{отрпсн}}; F_{\text{прну}} = 0,055F_{\text{отрпсн}}; F_{\text{прнз}} = 0,949F_{\text{отрпсн}}$$

Проекция нормальной реакции кромки нижнего ножа на воздействие грунта на продольно-вертикальную плоскость из рисунка 2 (зелёный вектор, голубой вектор) $N_{\Sigma\text{крпсн}} = 39942 \text{ Н/м}^3$ и $N_{\Sigma\text{крлсн}} = 39942 \text{ Н/м}^3$.

Проекцию нормальной реакции $N_{\Sigma\text{крпсн}}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{\text{отр}}$ (3):

$$N_{\text{крпсн}} = 39942 \frac{0,018}{133} = 5,4 \text{ Н.}$$

Примем коэффициент трения между сталью и грунтом $f_{\text{с-г}} = 0,5$. Сила трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа (4):

$$F_{\text{ткрпсн}} = 0,5 \cdot 5,4 = 2,7 \text{ Н.}$$

Сила трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа $F_{\text{ткрлсн}} = F_{\text{ткрпсн}} = 2,7 \text{ Н}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромку нижнего ножа (5):

$$u_{\text{ткрн}} = 2 \cdot 2,7 \cdot 133 = 718 \text{ Дж/м}^3.$$

Максимальный срезаемый слой грунта $h_{\text{сл}} = 0,25 \text{ м}$. Толщина нижнего ножа $h_n = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$. При таких параметрах срезаемого слоя [2] объём грунта, непосред-

ственно воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $\frac{V_{\text{г-к}}}{\tau_{\text{г-к}}} \approx 0,0063 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$. Масса грунта, воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $m_{\text{г-к}} \approx 10,1 \text{ кг/с}$. Мгновенная сила $F_{\text{г-н}}$ набегающего грунта $F_{\text{г-н}} \approx 17 \text{ Н/с}$. Время перемещения ковша на расстояние s_k при разработке грунта объёмом один кубический метр $\tau_k = 78,885 \text{ с/м}^3$. Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр (6):

$$F_{\Sigma\text{г-н}} = 17 \cdot 78,885 \approx 1341 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа (7):

$$u_{\text{г-н}} = 1341 \cdot 1,686 = 2261 \text{ Дж/м}^3.$$

Высота подъёма грунта равна толщине нижнего ножа $h_n = 0,015 \text{ м}$.

Допустим, плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, поднимаемого нижним ножом, (8):

$$m_{\text{под}} = 1600 \cdot 1 = 1600 \text{ кг.}$$

Условная сила подъёма грунта нижним ножом (9):

$$F_{\text{подн}} = 1600 \cdot 9,8 \approx 15680 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия, необходимая для подъёма грунта нижним ножом, (10):

$$u_{\text{подн}} = 1600 \cdot 9,8 \cdot 0,015 \approx 235 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 2 были вычислены проекции силы $F_{\text{отрпсн}}$: $F_{\text{прнх}} = 0,31F_{\text{отрпсн}}$; $F_{\text{прну}} = 0,055F_{\text{отрпсн}}$; $F_{\text{прнз}} = 0,949F_{\text{отрпсн}}$. По аналогии проекции на оси суммарной силы $F_{\text{подн}}$:

$$F_{\text{поднх}} = 0,31 \cdot 15680 = 4860 \text{ Н/м}^3;$$

$$F_{\text{подну}} = 0,055 \cdot 15680 = 862 \text{ Н/м}^3;$$

$$F_{\text{поднз}} = 0,949 \cdot 15680 = 14880 \text{ Н/м}^3.$$

Масса грунта, ускоряемого нижним ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_y = m_{\text{под}} = 1600 \text{ кг}$. Начальная вертикальная скорость грунта равна нулю: $v_{\text{начверт}} = 0$. Скорость ковша $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Конечная вертикальная скорость грунта (12):

$$v_{\text{конверт}} = 1,686 \cdot \tan 18,25^\circ = 0,556 \text{ м/с.}$$

Время перемещения нижнего ножа по грунту на расстояние $0,046 \text{ м}$ (13):

$$\tau_{\phi} = \frac{0,046}{1,686} = 0,00273 \text{ с.}$$

Вертикальное ускорение грунта (14):

$$a_{\text{верт}} = \frac{0,556-0}{0,00273} = 20,36 \text{ м/с}^2.$$

Условная сила для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом (11):

$$F_{\text{ун}} = 1600 \cdot 20,36 = 32586 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия, необходимая для вертикального ускорения грунта нижним ножом, (15):

$$u_{\text{ун}} = \frac{1600 \cdot 0,556^2}{2} \approx 247 \text{ Дж/м}^3.$$

На рисунке 3 условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа $F_{\Sigma\Gamma-н} = 1345 \text{ Н/м}^3$, направим по ходу ножа. Нанесём горизонтальную и вертикальную проекции условной силы $F_{\text{подн}}$ на продольно-вертикальную плоскость $F_{\text{поднх}} = 4860 \text{ Н/м}^3$; $F_{\text{поднз}} = 14880 \text{ Н/м}^3$. Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом $F_{\text{ун}} = 32586 \text{ Н/м}^3$ направим вертикально. Из рисунка совокупная нормальная реакция фаски нижнего ножа $N_{\Sigma\text{фн}} = 46844 \text{ Н/м}^3$. Приведенная нормальная реакция фаски нижнего ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (16):

$$N_{\text{фн}} = 46844 \frac{0,018}{133} \approx 6 \text{ Н.}$$

Сила трения грунта о фаску нижнего ножа (17):

$$F_{\text{тфн}} = 0,5 \cdot 6 = 3 \text{ Н.}$$

Энергия на преодоление трения грунта о фаску нижнего ножа (18):

$$u_{\text{тфн}} = 3 \cdot 133 \approx 400 \text{ Дж/м}^3.$$

Сложим все вертикальные силы: $F_{\text{прнз}} = 37956 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{поднз}} = 14880 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{ун}} = 32586 \text{ Н/м}^3$. Совокупная вертикальная равнодействующая сила

$$F_{\Sigma\text{нз}} = 37956 + 14880 + 32586 = 85422 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём вертикальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (19):

$$F_{\text{нз}} = 85422 \frac{0,018}{133} = 11,5 \text{ Н.}$$

Кроме того, силу $F_{\text{тфн}}$ трения грунта о фаску нижнего ножа разложим на горизонтальную и вертикальную составляющие (20, 21):

$$F_{\text{тфнх}} = 3 \cdot 0,949 = 2,8 \text{ Н.}$$

$$F_{\text{тфнз}} = 3 \cdot 0,313 = 0,94 \text{ Н.}$$

Нормальная реакция нижней плоскости нижнего ножа (22):

$$N_{\text{нпн}} = 11,5 + 0,94 \approx 12,4 \text{ Н.}$$

Сила трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт (23):

$$F_{\text{тнпн}} = 0,5 \cdot 12,4 \approx 6 \text{ Н.}$$

Энергия на преодоление трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт (24):

$$u_{\text{тнпн}} = 6 \cdot 133 = 798 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижним ножом, (25):

$$u_{\text{н}} = 80 + 718 + 2261 + 235 + 247 + 400 + 798 = 4739 \approx 4740 \text{ Дж/м}^3.$$

Сложим поперечные силы: $F_{\text{прну}} = 2218 \text{ Н/м}^3$ и $F_{\text{подну}} = 862 \text{ Н/м}^3$. Суммарная условная поперечная сила

$$F_{\Sigma\text{ну}} = 2218 + 862 = 3080 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём суммарную условную поперечную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (26):

$$F_{\text{ну}} = 3080 \frac{0,018}{133} = 0,4 \text{ Н.}$$

Поперечной силой, приложенной к нижнему лезвию можно пренебречь.

Сложим все горизонтальные продольные силы: $F_{\text{прнх}} = 12458 \text{ Н/м}^3$, $F_{\Sigma\Gamma-н} \approx 1345 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{поднх}} = 4860 \text{ Н/м}^3$. Суммарная условная горизонтальная продольная сила

$$F_{\Sigma\text{нх}} = 12458 + 1345 + 4860 = 18663 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём горизонтальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (27):

$$F_{\text{нх}} = 18663 \frac{0,018}{133} = 2,5 \text{ Н.}$$

Кроме того, имеются горизонтальные силы: сила $F_{\text{ткрпсн}} = 2,7 \text{ Н}$ трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа, сила

$F_{\text{ткрлсн}} = 2,7\text{Н}$ трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфнх}} = 2,8\text{Н}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{тппн}} = 6\text{Н}$ трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа, (28):

$$F_{\Sigma\text{нх}} = 2,5 + 2 \cdot 2,7 + 2,8 + 6 \approx 16\text{Н}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если суммарная энергия, обязательная для резания грунта консольными ножами около 20 кДж/м^3 , суммарная энергия для резания грунта правыми ножами свыше 71 кДж/м^3 , то суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижними ножами, менее 5 кДж/м^3 . Соответственно, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа, 144 Н [3], правого ножа – 730 Н , нижнего ножа 16 Н . Для определения общих затрат энергии на перемещение ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов ковша.

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. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. №2. С. 172-181.
3. Николаев В.А. Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. №4. С. 452-463.
4. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. 1989. Т. 120. С. 145-153.
5. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез // Материалы НТС ВИСХОМ. 1970. Вып. 27. С. 490-497.
6. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36-42.
7. Карнаухова 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.
8. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47-49.
9. Кириллов Ф.Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многорезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 44-48.
10. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 34-38.
11. 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.
12. 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.
13. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. Pp. 115-128.
14. 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.
15. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. Pp. 142-166.
16. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scope damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. Pp. 150-163.
17. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. Pp. 96-103.
18. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
19. 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.
20. Нилов В.А., Фёдоров Е.В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. №2. С. 7-10.
21. Чмиль В.П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18-20.
22. 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.
23. Сёмкин Д.С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. №1. С. 37-43.
24. Константинов Ю.В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. №5. С. 31-39.
25. Сыромятников Ю.Н., Храмов И.С., Войнаш С.А. Гибкий элемент в составе рабочих органов ро-

торной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. №5. С. 32-39.

26. 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.

27. 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.

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Opredelenie skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilaushchego sloya avtodorogi [Determining the speed of chains and the size of the soil layer cut off by the bucket of the unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 1: 32-43. (in Russian)

2. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the console knife blade with the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 2 : 172–181. (in Russian)

3. Nikolaev V.A. Analiz vzaimodejstviya pravogo nozha agregata nepreryvnogo dejstviya s gruntom [Analysis of the interaction of the right knife of the continuous action unit with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 1: 32-43.

4. Zhuk A.F. *Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rotacionnogo pluga*. [Theoretical justification of the rational technological scheme and parameters of the rotary plough]. *Teoriya i raschyot pochvoobrabatyvayushchih mashin*. 1989; 120: 145-153. (in Russian)

5. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of milling cutters]. *Materials VISHOM NTS. ONTI VISHOM*. 1970; 27: 490-497. (in Russian)

6. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchyotom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determination of the ground cutting force taking into account elastic deformations during destruction]. *Construction and road machinery*. 2008; 4: 36-42. (in Russian)

7. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevyimi frezami [Determination of specific energy costs for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*. 2010; 1: 20-22. (in Russian)

8. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoy glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofreznoj [Critical depth of the cut determination in the combined cutting soil by hydromiller]. *Construction and road machinery*. 2010; 5: 47-49. (in Russian)

9. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model

of the traction force time distribution for multi-section working bodies of earth moving machines]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 44-48. (in Russian)

10. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po povernosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Soil friction effect on the knife surface on cutting resistance]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 34-38. (in Russian)

11. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofreznykh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh gruntov [Improving the efficiency of disc milling working mechanisms for the development of frozen soils]. *Construction and road machinery*. 2012; 8: 42-44. (in Russian)

12. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistance in the soil development with a ripper according to the integral strength indicator]. *Construction and road machines*. 2005; 3: 38-40. (in Russian)

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

14. 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.

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

16. 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.

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

18. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007; 448.

19. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Issledovanie upravlyaemykh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Research of controlled knife systems of earth moving and transport vehicles]. *Construction and road vehicles*. 2017; 2: 12-15. (in Russian)

20. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Soil development with a scraper in free cutting conditions]. *Construction and road machines*. 2016; 2: 7-10. (in Russian)

21. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelya s avtomaticheskimi vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator ripper drive with an automatic choice of a cutting angle]. *Construction and road machines*. 2016; 11: 18-20. (in Russian)

22. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the soil digging process with a rotary-disk working bodies under the hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 4: 23-28. (in Russian)

23. Syomkin D.S. O vliyaniy skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the speed influence of the working body on the resistance strength to cutting soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 1: 37-43. (in Russian)

24. Konstantinov Yu.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method for calculating the resistance and a resistance moment to cutting soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*. 2019; 5: 31-39. (in Russian)

25. Syromyatnikov Yu.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the working bodies of a rotary tillage and ripper separation machine]. *Tractors and agricultural machines*. 2018; 5: 32-39. (in Russian)

26. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of mechanisms for mov-

ing working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*. 2018; 1: 47-54. (in Russian)

27. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Modeling the operation of a screw l-shaped knife of a tillage mill]. *Tractors and agricultural machines*. 2017; 7: 13-19. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ 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, тел. 8 910 961 51 87, e-mail: nikolaev53@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. Phone: 8 910 961 51 87, e-mail: nikolaev53@inbox.ru.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ОТ АВТОТРАНСПОРТА И ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К СТРУКТУРИРОВАНИЮ АВТОПАРКА

О.В. Максимова^{1,2}, В.А. Гинзбург^{1,3}, В.М. Лытов¹

¹ФГБОУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», г. Москва, Россия,

²НИТУ «МИСиС»,

г. Москва, Россия,

³Институт географии РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В исследовании приведены результаты расчета выбросов парниковых газов и загрязняющих твердых веществ парком автотранспортных средств на основании трех независимых оценок набора исходных данных о разбиении автопарка по технологическим классам (количества и типы автотранспортных средств разных экологических классов, годовых пробегов и т. д.). Так как эти данные не приводятся в формах государственной статистической отчетности и генерируются исследователями самостоятельно, решена задача определения их значимости для расчета итоговых выбросов в разрезе большого массива данных для территории России.

Материалы и методы. В работе предложено три различных подхода к расчету выбросов парниковых газов (базовый подход, уравнивание транспортной работы и новый подход – уравнивание потребления топлива) с целью выявления различий полученных объемов выбросов в разных условиях (т.е. определения количественных характеристик точности итоговых значений). Разработан новый способ оценки влияния средних пробегов и распределения автомобилей на классы на итоговые значения выбросов, реализованный в рамках каждого предложенного подхода. Помимо этого авторами сформулированы формулы чувствительности двух типов для оценки влияния распределения автомобилей на классы и средних пробегов к итоговым расчетам выбросов. Применение этих формул позволяет проводить научный анализ и интерпретацию влияния формирующих факторов в экспертной оценке на итоговые значения выбросов каждого вида.

Результаты. Выявлены различия разбиения автомобилей на классы в экспертных оценках и определены наиболее близкие из них. Выведено, что наиболее чувствительными к изменению пробегов и класса автомобилей, от которых зависит расход топлива, являются выбросы CO₂.

Заключение. Научный анализ чувствительностей обоих типов показал важность сохранения принципов, лежащих в основе экспертной оценки, от года к году с целью необходимости сопоставления получаемых результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, структура парка, экологический класс, годовой пробег, удельный расход топлива, выбросы парниковых газов.

БЛАГОДАРНОСТИ. Исследования выполнены за счет средств темы НИР Росгидромета № 3.3 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ», Гранта РФФИ № 18-05-60183119 «Процессы и последствия дальнего атмосферного переноса черного углерода и радионуклидов в Арктике» и НИР по Плану Фундаментальных научных исследований государственных академий наук № 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России». Также авторы выражают свою признательность рецензентам статьи.

Поступила 09.07.20, принята к публикации 23.10.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Максимова О.В., Гинзбург В.А., Лытов В.М.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Максимова О.В., Гинзбург В.А., Лытов В.М. Сравнение методик расчета выбросов от автотранспорта и их чувствительности к структурированию автопарка. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-612-622>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-612-622>

COMPARISON OF METHODS FOR VEHICLE EMISSIONS CALCULATION AND THEIR SENSITIVITY TO FLEET STRUCTURING

O.V. Maksimova^{1,2}, V.A. Ginzburg^{1,3}, V.M. Lytov¹

¹ Yu. A. Izrael Institute of Global climate and ecology;
Moscow, Russia,

² Moscow Institute of Steel and Alloys,
Moscow, Russia,

³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. The study presents the results of the calculation of greenhouse gas emissions and polluting solids by vehicles fleet on the basis of three independent estimates of the set of initial data on the breakdown of the fleet by technological classes (the number and types of vehicles of different ecological classes, annual mileage, etc.). Such data is not provided in the forms of state statistical reports and is generated by the researchers. The article solves the problem of determining their significance for calculating the total emissions in the context of a large data array for the territory of Russia.

Materials and methods. Three different versions to the calculation of greenhouse gas emissions (basic version, equalization of transport work and new approach - equalization of fuel consumption) are proposed in order to identify differences in the obtained emissions in different conditions (i.e., to determine quantitative characteristics of the accuracy of the final values). A new method has been developed for assessing the effect of average mileage and vehicle distribution on classes on the total emissions values, implemented within each proposed version. In addition, two types of sensitivity formulas are formed by the authors to assess the impact of vehicle distribution on classes and average mileage to final emission calculations. The use of these formulas provides scientific analysis and interpretation of the influence of the factors in expert review on the final values of the emissions of each type.

Results. The differences in sorting cars into classes in expert evaluations were revealed and the closest ones are determined. It was found that the most sensitive to changes in mileage and class of cars, on which fuel consumption depends, are CO₂ emissions.

Conclusion. The scientific sensitivity analysis of both types showed the importance of maintaining the principles underlying expert evaluation from year to year in order to ensure that the results obtained are consistent.

KEYWORDS: road transport, fleet structure, environmental class, annual mileage, specific fuel consumption, greenhouse gas emissions.

Submitted 09.07.20, revised 23.10.2020.

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: Maksimova O.V., Ginzburg V.A., Lytov V.M. Comparison of methods for vehicle emissions calculation and their sensitivity to fleet structuring. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-612-622>

© Maksimova O.V., Ginzburg V.A., Lytov V.M.



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

ВВЕДЕНИЕ

В России результаты оценки объемов и динамики выбросов парниковых газов транспортом представляются в Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом [1]. Согласно положениям Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК [2], по которым разрабатывается Национальный кадастр России, транспорт относится к сфере энергетики, определяющей около 70% суммарных выбросов парниковых газов в стране.

В последние годы суммарный выброс парниковых газов от автотранспорта стабилизировался на уровне около 160 млн т CO₂ экв. в год, что составляет около 11% выбросов парниковых газов от всех видов деятельности, связанных со сжиганием топлива. В этих оценках учитываются выбросы при сжигании топлива только передвижными источниками, при этом выбросы парниковых газов стационарными источниками автомобильного транспорта могут достигать до 40–50% выбросов парниковых газов передвижными источниками [3, 4].

Выбросы твердых частиц от автотранспорта входят в перечень загрязняющих веществ, которые оцениваются с применением Руководства по инвентаризации выбросов ЕМЕП¹ и представляются в секретариат Конвенции о трансграничном атмосферном переносе загрязняющих веществ на большие расстояния. По данным последнего кадастра, в России [5] выбросы твердых веществ диаметром менее 2,5 мкм, в состав которых входит и черный углерод, составляли в 2017 г. 281 тыс. т, из которых на долю автотранспорта приходилось 31,5 тыс. т, а в 2014 г. выбросы от автотранспорта оценивались в 39,8 тыс. т. [6].

Оценка выбросов от автотранспорта осложняется отсутствием необходимых статистических данных и различными подходами в их расчете [7, 8]. Для проведения корректных оценок необходимо иметь детализированные исходные данные и учитывать влияние формирующих факторов на результаты их расчетов.

Целью данной работы является анализ и сравнение трех экспертных оценок (МАДИ, ИГКЭ, JGCRI) расчета выбросов парниковых газов парком автотранспортных средств (АТС) с позиции влияния формирующих факторов: средних пробегов и распределения автомобилей на классы. Исследование проводилось для каждого из двух основных подходов верификации и анализа исходных данных:

- первый подход основан на сравнении независимых экспертных оценок структурирования автопарка в их первоначальном виде (данный метод в работе называется базовым);
- второй подход основан на уравнивании исходных экспертных оценок с использованием единого критерия суммарной деятельности автопарка за год (в работе было выбрано два разных критерия уравнивания входящих показателей: уравнивание транспортной работы и уравнивание потребления топлива).

В дальнейшем это исследование будет способствовать стандартизации методики расчета выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчет выбросов парниковых газов (ПГ) и твердых частиц проводился с использованием программного модуля COPERT-IV v.11.3², реализующего методику Европейского агентства по охране окружающей среды¹, рекомендуемую для использования на национальном уровне для инвентаризации выбросов парниковых газов от автодорожного транспорта. Данный подход соответствует второму уровню МГЭИК [2] для CO₂ и третьему уровню для CH₄ и N₂O.

Эмиссии ПГ от автомобилей в программе COPERT-IV рассчитываются с учетом среднегодовых пробегов, средней скорости движения на городских, сельских дорогах и автомагистралях, типа, массы транспортного средства, объема двигателя, вида топлива. В качестве исходных данных используются удельные (на единицу пробега или единицу потребленного топлива) выбросы ПГ, которые зависят от года выпуска АТС и наличия средств подавления выбросов загрязняющих веществ.

¹ EEA: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2013. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark [Internet resource] <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013> (дата обращения: 11.10.2018).

² COPERT Versions [Электронный ресурс] – URL: <http://www.emisia.com/copert/> (дата обращения: 09.11.2018).

Для исследования влияния средних пробегов и класса автомобилей на суммарные расчеты выбросов CO_2 , CH_4 , N_2O , $\text{PM}_{2.5}$ за 2014 г. в атмосферу от автопарка России произведены расчеты для трех экспертных оценок, сравнение которых в целом при каждом подходе (в базовом варианте, в условиях уравненной транспортной работы и уравненного потребления топлива) исследовалось авторами ранее [9]. В работе [9] показано, что расчет выбросов с помощью метода уравнивания потребления топлива показывает наилучшую сходимость как по средним показателям, так и по разбросам внутри и между всеми рассматриваемыми в работе экспертными оценками. Экспертные оценки:

1. МАДИ: при расчете выбросов ПГ автомобильным парком специалисты ориентируются на формулу №1-БДД [10] и учитывают изменение численности АТС в парке по виду топлива и экологическому классу на основании анализа динамики их поставок и выбытия из парка [11,12,13,14].

2. ИГКЭ: использован при расчете выбросов ПГ парком АТС в национальном кадастре за период с 1990 по 2018 гг. [15], также ориентирован на формулу №1-БДД и учитывает результаты экспертных оценок и анализа актуальной информации и данных периодической печати об активно используемой доле автомобильного парка³ [16].

3. JGCRI, USA: специалисты в своих работах [17, 18] используют данные по виду топлива и экологическому классу АТС, приведенные аналитическим агентством «Автостат» [19], и учитывают только численность «активно используемого парка АТС», а не весь списочный состав парка.

В базовом варианте исходные данные применялись в соответствии с авторской оценкой, приведенной в каждом из трех выбранных подходов.

Так как данные об «активном парке» у авторов разные (за исключением экспертной оцен-

ки 1, в которой весь автопарк считается активным), то в варианте уравненной транспортной работы величины среднегодовых пробегов соответствующих категорий АТС по экспертным оценкам 2 и 3 увеличивались пропорционально доле «активно используемых» АТС каждой категории и вида используемого топлива от списочной численности парка АТС. Под транспортной работой в данной статье понимается произведение численности автопарка и годовых пробегов в соответствующих группах АТС, которая определяется по формуле

$$T_p = \sum_j (M1_j \cdot l_{M1j} + N1_j \cdot l_{N1j} + N2_j \cdot l_{N2j} + N3_j \cdot l_{N3j} + M2_j \cdot l_{M2j} + M3_j \cdot l_{M3j}) \text{ ед}^* \text{км},$$

где $M1$ – численность легковых АТС, ед.; $N1$ – численность легких коммерческих АТС массой до 3,5 т, ед.; $N2$ – численность грузовых АТС массой от 3,5–12 т, ед.; $N3$ – численность грузовых АТС массой более 12 т, ед.; $M2$ – численность автобусов массой до 5 т, ед.; $M3$ – численность автобусов массой более 5 т, ед.; j – вид потребляемого топлива, бензин/дизельное топливо (ДТ); l – средний годовой пробег АТС каждой группы, км.

Следующий подход снижения неопределенностей оценок выбросов – соблюдение условия равного годового расхода топлива парком автотранспортных средств. Официальными и наиболее полными данными о потреблении топлива являются данные, ежегодно представляемые Росстатом, поэтому важно, чтобы конечное потребление топлива, полученное при всех расчетах, совпадало с данными статистики. Для этого была проведена корректировка средних пробегов каждого из технологических классов АТС. В результате применения такой корректировки отклонение полученных оценок годового потребления топлива для каждого из вариантов расчета от данных Росстата не превышало 1%.

³ Статистика продаж новых автомобилей в России за 2006–2014 год [Интернет ресурс] <https://auto.vercity.ru/statistics/sales/europe/2010/russia/> (Дата последнего обращения 14.06.2018).

RAMR: Corporate truck fleet in Russia, Russian Automotive Market Research. Moscow [Internet resource] <http://www.napinfo.ru/page/id/10180> (Accessed: 21.05.2016).

Отчет Russian Automotive Market Research «Парк легковых автомобилей на 1.01.2017 г.» [Интернет ресурс] <http://www.napinfo.ru/articles/avtostatistika-analiz-avtomobilnogo-rynka-o-kompanii-avtomobilnyy-rynok-2> (Дата обращения 14.06.2018).

Avtostat: Vehicle fleet in Russia in 2014. Avtostat [Internet resource] <http://avtostat-info.com/Article/130> (Accessed: 18.02.2016; 2015 in Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВЫБРОСОВ

Изучим влияние распределения по классам автомобилей и средней величины пробега отдельно на величину каждого из видов выбросов в рамках каждого подхода для каждой экспертной оценки. Предложен метод перерасчета величины выбросов: нивелирование в первом случае влияния средних пробегов путем деления общей величины выбросов по каждому классу на средний пробег этого класса, а во втором случае нивелирование влияния классов автомобилей делением общей величины выбросов по каждому классу на число автомобилей этого класса. По полученным данным по каждому виду выбросов проведен одномерный дисперсионный анализ в пакете *Statistica 15* [20].

1. Влияние распределения автомобилей на классы (т.е. при нивелировании средних пробегов). Для выбросов CO_2 , CH_4 и N_2O расчеты, сделанные с помощью исходных данных, в экспертной оценке JGCR1 показали заниженные результаты по сравнению с исходными данными МАДИ и ИГКЭ при всех подходах (в базовом варианте, в условиях уравнированной транспортной работы и в условиях уравнированного расхода топлива).

При изучении влияния на расчетные значения выбросов $\text{PM}_{2.5}$ выявлено нарушение предпосылок дисперсионного анализа. Ввиду этого использовался непараметрический ранговый критерий Краскела-Уоллиса (H-критерий), который для большого объема выборки показателен и предназначен для проверки равенства медиан нескольких групп [21]. Важным результатом его применения послужило выявление существенных различий в расчетах выбросов $\text{PM}_{2.5}$, которые продемонстрированы на рисунке при помощи диаграмм box-and-whiskers («ящик с усами») [22].

2. Влияние средних пробегов (т.е. нивелирование распределения автомобилей на классы). При изучении в методиках влияния пробегов на расчетные значения выбросов выявлено:

– при базовом методе сравнения различия оказались статистически значимы относительно расчетов всех выбросов на уровне 5%;

– в условии равной транспортной работы статистическая значимость наблюдается для выбросов CO_2 ;

– в условиях равного расхода топлива статистическая значимость методик подтверждена для всех выбросов, кроме CH_4 .

Таким образом, на расчетные значения различных экспертных оценок выбросов при разных подходах сравнения оказывает наибольшее влияние в первую очередь распределение автомобилей на классы. На расчетные значения лишь некоторых видов выбросов оказывают влияние также и величины средних пробегов, рассматриваемых в экспертных оценках.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДИКИ ИГКЭ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ К ИЗМЕНЕНИЯМ ФАКТОРОВ

Ранее авторами исследовано, что при разных подходах сравнения (базовый вариант, условия уравнированной транспортной работы, равный расход топлива) три экспертные оценки показали хорошее статистическое согласование [9]. Поэтому в рамках проведенного исследования для варианта ИГКЭ рассчитаем чувствительность к формирующим факторам: к классу автомобиля и величинам пробегов в 2018 г. по отношению к базовому 2014 г. [23, 24]. В работе предложена формула для расчета индексов чувствительности разных типов.

Индекс первого типа I_x показывает, как реагирует методика расчета определенного вида выброса на изменение выбранного фактора от базового к текущему году [25]. А именно как изменяется разность соответствующего выброса между текущим и базовым годами в ответ на однопроцентное увеличение этого вида выбросов как в текущий, так и в базовый годы:

$$I_x = \left(\frac{0,01 \cdot D_x + \sum D_i - (0,01 \cdot C_x + \sum C_i)}{0,01 \cdot C_x + \sum C_i} - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где D_x суммарное значение выброса вида x в текущий год, C_x суммарное значение выброса вида x в базовый год, $\sum D_i$ – сумма всех выбросов по транспорту в текущий год, $\sum C_i$ – сумма всех выбросов по транспорту в базовый год. В работе произведены расчеты согласно формуле (1) по каждому виду выбросов CO_2 , CH_4 , N_2O и $\text{PM}_{2.5}$ в условиях нивелирования влияния средних пробегов и в условиях нивелирования влияния классов автомобилей. В каждом случае однопроцентное увеличение рассматриваемого вида выброса отражает соответствующее изменение входящего фактора в рамках нивелирования другого.

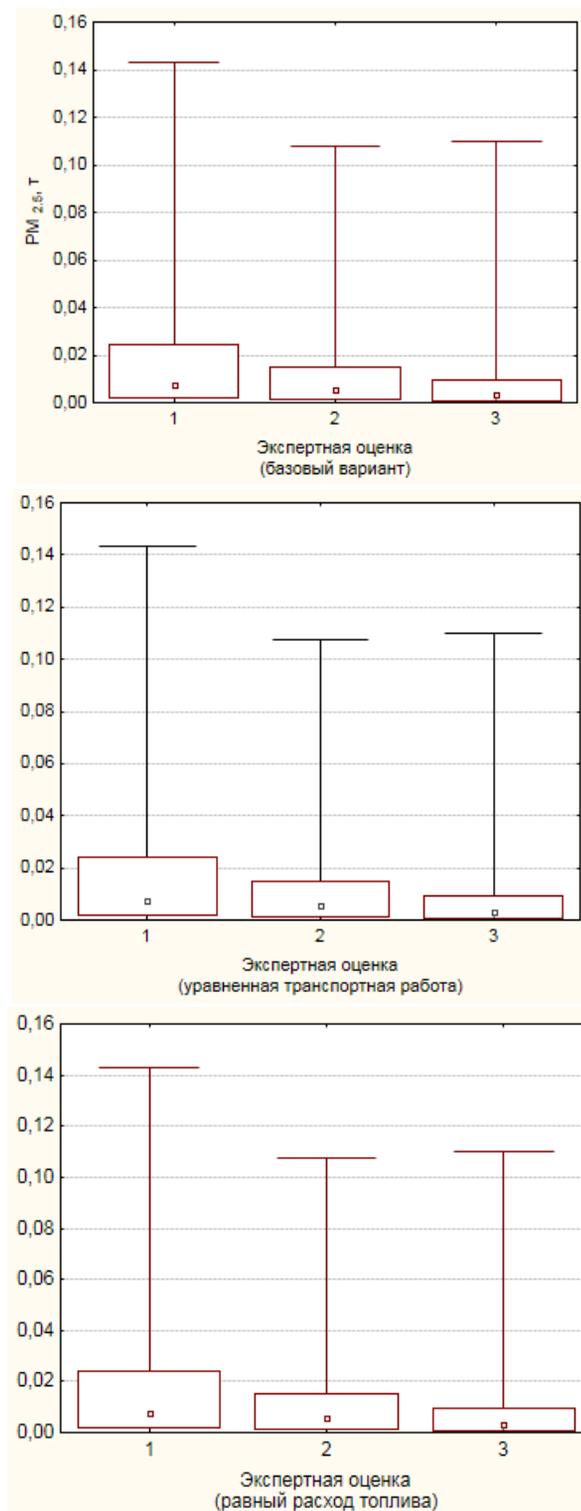


Рисунок 1 – Диаграмма box-and-whiskers для выбросов $PM_{2.5}$ относительно каждой методики разбиения автомобилей на классы (1 – МАДИ, 2 – ИГКЭ, 3 – JGCR): в базовом варианте, при уравненной транспортной работе, при равном расходе топлива

Figure 1 – The box-and-whiskers diagram for $PM_{2.5}$ emissions relative to each methodology for dividing cars into classes (1 – MADi, 2 – IGCE, 3 – JGCR): in the basic version, with equal transport work, with equal fuel consumption

Результаты расчетов представлены в таблице 1. Показатели I_x близки к нулю по всей таблице, что свидетельствует о низкой чувствительности методики к изменениям каждого из факторов по отдельности между базовым и текущим годами. Это говорит о том, что модели в 2014 и 2018 гг. имеют очень высокое качество верификации исходных данных.

Индекс второго типа J_x показывает, как реагирует методика расчета определенного вида выброса x на изменения выбранного фактора лишь в текущем году. А именно как изменится разность соответствующего выброса x между текущим и базовым годами в ответ на

однопроцентное увеличение этого вида выброса в текущий год:

$$J_x = \left(\frac{0,01 \cdot D_x + \sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} - \frac{\sum D_i - \sum C_i}{\sum C_i} \right) \cdot 100\% = \frac{D_x}{\sum C_i} \quad (2)$$

где D_x суммарное значение выброса вида в текущий год, C_x суммарное значение выброса вида x в базовый год, $\sum D_i$ – сумма всех выбросов по транспорту в текущий год, $\sum C_i$ – сумма всех выбросов по транспорту в базовый год [25]. Чувствительность J_x не коррелирует между базовым и текущим годом, т.е. она отражает чувствительность тенденции выбросов к случайным изменениям фактора в текущем году.

Таблица 1
Коэффициенты I_x чувствительности первого типа по двум категориям: влияние класса автомобиля и влияние средних пробегов модели ИГКЭ

Table 1
The coefficients I_x of the sensitivity of the first type in two categories: the influence of the car class and the influence of the average mileage of the IGCE model

Вид выброса	I_x Влияние класса автомобиля, %	I_x Влияние средних пробегов, %
CO ₂	0,00007	0,00003
CH ₄	0,00006	0,00001
N ₂ O	0,00001	0,00000
PM _{2,5}	0,00000	0,00002

Таблица 2
Коэффициенты J_x чувствительности второго типа по двум категориям: влияние класса автомобиля и влияние средних пробегов модели ИГКЭ

Table 2
The coefficients J_x of the sensitivity of the second type in two categories: the influence of the class of the car and the influence of the average mileage of the IGCE model

Вид выброса	J_x Влияние класса автомобиля, %	J_x Влияние средних пробегов, %
CO ₂	0,95733	0,39871
CH ₄	0,00014	0,00002
N ₂ O	0,00002	0,00001
PM _{2,5}	0,00010	0,00008

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что наиболее чувствительными являются выбросы CO_2 . Это можно обосновать тем, что выбросы CO_2 рассчитываются через расход топлива, который в свою очередь значительно зависит от пробега и класса автомобиля. При этом чувствительность к распределению автомобилей по классам и/или изменение их численности внутри класса по всем категориям выбросов выше, чем чувствительность к изменению средних пробегов. Происходит это в результате того, что корректировка средних пробегов основывается на данных топливно-энергетического баланса (ТЭБ) за соответствующий год. Также за последние 5–10 лет новые автомобили с современными двигателями классов евро 4 и евро 5 все активнее замещают старые автомобили классов евро 0–3, а рост среднегодовых пробегов автомобилей осуществляется с более низкой скоростью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

При изучении влияния разбивки автомобилей на классы в условиях уравнивания расхода топлива выявлено статистически значимое отличие для выбросов $\text{PM}_{2.5}$. Это характеризует различия в подходе экспертных оценок разбивки автомобилей на классы, наиболее близкими из которых оказались первые две методики МАДИ и ИГКЭ. Исследование экспертной оценки ИГКЭ к изменению распределения автомобилей на классы подтвердило наибольшую чувствительность в отношении выбросов CO_2 .

Приведенные в исследовании результаты на чувствительность второго типа (изменчивость по отношению к текущему году) свидетельствуют о важности сравнения экспертных оценок расчета выбросов в первую очередь по распределению автомобилей на классы. Это свидетельствует о необходимости ведения статистики по базам данных распределения автомобилей по экологическим классам от различных источников (база данных ГИБДД, автомобильные справочники, научно-технические отчеты и данные периодической печати) ввиду возможного рассогласования их результатов, прежде всего, по выбросам CO_2 .

Отметим, что анализ чувствительностей как первого, так и второго типов в совокупности показал важность сохранения принципов, лежащих в основе экспертной оценки, от года к году с целью необходимости сопоставления получаемых результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2017 гг. Москва, 2019. С. 57–60.
2. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. / под ред. С. Игглестона, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К. Танабе // Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. 2006, Т.1-5.
3. Yu. Trofimenko, V. Komkov and V. Donchenko Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia // International Conference on Sustainable Cities IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 177 (2018) 012014. 11 p.
4. Кевеш А.Л., Сабельникова М.А., Агеева Л.И. Транспорт и связь в России 2016 // Статистический сборник. 2016. 47 с
5. ИДК, 2019. Информационный доклад о кадастре Российской Федерации. МПР, Москва. 2019.
6. Суринов А. Е., Баранов Е.Ф., Безбородова Т.С. Российский статистический ежегодник 2017 // Статистический сборник. 2017. 442 с.
7. Горяев Н.К., Бандурко С.О., Хабибуллодова Х.Х. Автомобильный транспорт: переход от нормирования расхода топлива к учету парниковых газов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2020. Т.14. №1. С. 175–179.
8. Потапченко Т.Д., Трофименко Ю.В. Верификация значений валовых выбросов парниковых газов автомобильным транспортом с помощью методов интеллектуального анализа данных // Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». Орел, 2019. С. 276–283.
9. Максимова О.В, Лытов В.М., Гинзбург В.А. Сравнительный анализ методик расчета углеродного следа автотранспорта в России // Контроль качества продукции. 2020. № 7. С. 44–48.
10. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2013 гг. Москва, 2015. С. 57–60.
11. Трофименко Ю.В., Комков В.И., Григорьева Т.Ю. Прогноз численности и структуры автомобильного парка Российской Федерации по экологическому классу, типу энергоустановок и виду топлива на период до 2030 года // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов. 2017.С. 20–24.
12. Трофименко Ю.В., Ефремов А.В., Фурсов С.Б. Упрощенная методика прогнозирования численности парка автотранспортных средств // Совершенствование автомобильных и тракторных двигателей. Сборник научных трудов. Москва. 1992. С. 27–32.

13. Григорьева Т.Ю., Трофименко Ю.В. Прогноз выбросов загрязняющих веществ в атмосферу автотранспортным комплексом Российской Федерации на период до 2030 года // Автотранспортное предприятие. 2009. № 3. С. 31-35.

14. Donchenko V., Kunin Y., Ruzski A., Mekhonoshin V., Barishev L., Trofimenko Y. Estimated atmospheric emission from motor transport in Moscow based on transport model of the city // Transportation Research Procedia. 2016. Pp. 2649-2658.

15. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2016 гг. М. 2018. С. 58–61.

16. Yan, F., Winijkul, E. Jung, S., Bond, T. C., and Streetsm D. G. Global emission projections of particulate matter (PM): I. Exhaust emission from on-road vehicles. Atmos. Environ., 2011.

17. Kholod N., Meredydd E., Kuklinski T. Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources// Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. Pp. 11267-11281.

18. Evans, M., Kholod, N., Malyshev, V., Tretyakova, S., Gusev, E., Yu, S., Barinov, A. Black Carbon Emissions from Russian Diesel Sources: Case Study of Murmansk. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 15, 3257-3284, 2015.

19. Avtostat: Park of PC, LCV, HCV, BUS as of 01.01.2015 (Russia, Russian regions). Dataset, Avtostat. Togliatti. Russia. 2015.

20. Закс Л. Статистическое оценивание. Москва, Статистика. 1986. 360 с.

21. Тюрин Ю.Н. Непараметрические методы статистики. Москва, Знание. 1978. 64 с.

22. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. Москва, МИР, 1981. 694 с.

23. Трофименко Ю.В., Гинзбург В. А., Комков В. И., Лытов В. М. Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов // Вестник СибАДИ. Омск. 2018. Том 15. № 6. С. 898-910.

24. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2018 гг. Москва, 2020. С. 58–61.

25. Воробьева Н.А., Дюкина Т.О. К вопросу применения индексного метода в экономике // Наука и мир. 2014. Т. 2. № 6(10). С. 70-74.

REFERENCES

1. Nacional'nyj doklad o kadastrе antropogen-nyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotiteljami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990 – 2017 gg. [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and by sinks removals of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the 1990 – 2013 years]. Moscow, 2019, pp. 57-60.

2. Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov. Podgotovleny Programmoj MGEIK po nacional'nyim kadastram parnikovyh gazov. Pod red. S. Igglestona, L.Buendia, K.Miva, T.Ngara i K.Tanabe. T.1–5. IGES, Hajyama, 2006.

3. Yu Trofimenko, V Komkov and V Donchenko Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. *International Conference on Sustainable Cities IOP Publishing*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 177 (2018) 012014, 11 pp.

4. Kevesh A. L., Sabel'nikova M. A., Ageeva L. I. Transport i svjaz' v Rossii 2016 [Transport and communications in Russia, 2016]. Statisticheskij sbornik, 2016. 47 p.

5. IDK, 2019. *Informatsionnyj doklad o kadastrе Rossijskoj Federatsii*. MPR, Moskva, 2019.

6. Surinov A. E., Baranov E. F., Bezborodova T. S. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik 2017, [Russian statistical yearbook]. Statisticheskij sbornik, 2017. 442 p.

7. Goryaev N.K., Bandurko S.O., Khabibullozoda Kh.Kh. Avtomobil'nyj transport: perekhod ot normirovaniya raskhoda topliva k uchetu parnikovyh gazov [Road transport: the transition from standardizing fuel consumption to accounting for greenhouse gas emissions]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management, 2020; 14. 1: 175–179. (in Russian)

8. Potapchenko T.D., Trofimenko YU.V. Verifikatsiya znacheniy valovykh vybrosov parnikovyh gazov avtomobil'nyim transportom s pomoshch'yu metodov intellektual'nogo analiza dannykh [Verification of values of gross greenhouse gas emissions by automobile transport using data mining methods]. Materialy 5-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Informatsionnyye tekhnologii i innovatsii na transporte». Orel, 2019. 276-283. (in Russian)

9. Maksimova O.V, Lytov V.M., Ginzburg V.A. Svravnitel'nyj analiz metodik rascheta uglerodnogo sleda avtotransporta v Rossii [Comparative analysis of methods for calculating the carbon footprint of vehicles in Russia]. *Kontrol' kachestva produktsii*. 2020;7: 44-48. (in Russian)

10. Nacional'nyj doklad o kadastrе antropogen-nyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotiteljami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990 – 2013 gg [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and by sinks removals of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the 1990 – 2013 years]. Moscow, 2015. 57-60.

11. Trofimenko YU.V., Komkov V.I., Grigor'eva T.YU. Prognoz chislennosti i struktury avtomobil'nogo parka Rossijskoj Federatsii po ekologicheskomu klassu, tipu energoustanovok i vidu topliva na period do 2030 goda / [Forecast of the number and structure of the car park of the Russian Federation by ecological class, type of power plants and type of fuel for the period up to 2030]. *Ekologiya i bezopasnost' zhizned-*

eyatel'nosti promyshlennno-transportnyh kompleksov. 2017. 20-24. (in Russian)

12. Trofimenko YU.V., Efremov A.V., Fursov S.B. Uproshchennaya metodika pro-gnozirovaniya chislennosti parka avtotransportnyh sredstv. [Simplified methodology for predicting the size of the vehicle fleet]. *Sovershenstvovaniye avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley*. Moscow, 1992. 27-32. (in Russian)

13. Grigor'eva T.Ju., Trofimenko Ju.V. Prognoz vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu avtotransportnym kompleksom Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of emissions of pollutants into the atmosphere by the autotransport complex of the Russian Federation for the period up to 2030]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2009; 3: 31-35. (in Russian)

14. Donchenko V., Kunin Y., Ruzski A., Mekhonoshin V., Barishev L., Trofimenko Y. Estimated atmospheric emission from motor transport in Moscow based on transport model of the city. *Transportation Research Procedia*, 2016. 2649-2658.

15. *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogen-nyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotiteljami parnikovyyh gazov, ne reguliruemyyh Monreal'skim protokolom za 1990 – 2016 gg* [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the years 1990 – 2016]. Moscow, 2018. 58-61.

16. Yan, F., Winijkul, E. Jung, S., Bond, T. C., and Streetsm D. G. Global emission projections of particulate matter (PM): I. Exhaust emission from on-road vehicles. *Atmos. Environ.*, 2011.

17. Kholod N., Meredydd E., Kuklinski T. Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources. *Atmos. Chem. Phys.* 2016; 16: 11267-11281.

17. Kholod N., Meredydd E., Kuklinski T. Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources// *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. Pp. 11267-11281.

18. Evans, M., Kholod, N., Malyshev, V., Tretyakova, S., Gusev, E., Yu, S., Barinov, A. Black Carbon Emissions from Russian Diesel Sources: Case Study of Murmansk. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 3257-3284, 2015.

19. Avtostat: Park of PC, LCV, HCV, BUS as of 01.01.2015 (Russia, Russian regions). Dataset, Avtostat, Togliatti, Russia, 2015.

20. Zaks L. Statisticheskoye otsenivaniye [Statistical estimation] Moscow, Statistika, 1986, 360 p.

21. Tyurin YU.N. *Neparametricheskie metody statistiki* [Nonparametric methods of statistics]. Moscow, Znaniye, 1978. 64 p.

22. T'yuki, Dzh. *Analiz rezul'tatov nablyudenij. Razvedochnyj analiz* [Analysis of observation results. Exploratory analysis]. Moscow, MIR, 1981. 694 p.

23. Trofimenko YU.V., Ginzburg V. A., Komkov V. I., Lytov V. M. Vliyaniye struktury parka avtotransportnyh sredstv po vidu topliva i ekologicheskomu klassu na vybrosy parnikovyyh gazov [Influence of the structure of the vehicle fleet by fuel type and environmental class on greenhouse gas emissions]. *Vestnik SibADI*, 2018; 15 (6): 898-910. (in Russian)

24. *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogen-nyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotiteljami parnikovyyh gazov, ne reguliruemyyh Monreal'skim protokolom za 1990 – 2018 gg* [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and by sinks removals of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the 1990 – 2018 years]. Moscow, 2020. 58-61.

25. Vorob'yeva N.A., Dyukina T.O. K voprosu primeneniya indeksanogo metoda v ekonomike [On the issue of applying the index method in the economy]. *Nauka i mir*, 2014; 2. 6 (10): 70-74. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Максимова О.В. – разработка концепции сравнительного анализа, проведения расчетов и сравнительного анализа.

Гинзбург В.А. – формирование научных подходов к сравнению методик, постановка исследования, оценка достоверности результатов.

Лытов В.М. – разработка подходов ИГКЭ к структурированию автопарка, проведение расчетов по программе COPERT-IV.

AUTHORS CONTRIBUTION

Olga V. Maksimova – development of the comparative analysis concept, calculations and comparative analysis.

Veronika A. Ginzburg – formation of scientific approaches to the comparison of methods, study statement, assessment of the results reliability.

Vladislav M. Lytov – development of the IGCE approaches to structuring the fleet, making calculations according to the Copert-IV program.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Максимова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, ORCID id – 0000-0002-0569-8650, Scopus Author ID – 57201281760, ResearcherID – AAB-8632-2020, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Институт Глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», (107058, Москва, Глебовская ул., 20Б), доц. кафедры математики, ФГБУ «МИСиС», (119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4.). e-mail: o-maximova@yandex.ru.

Гинзбург Вероника Александровна – канд. геогр. наук, ORCID id – 0000-0002-2082-5259, Scopus Author ID – 25723084200, ResearcherID – V-5071-2017, заведующая отделом, ФГБУ «Институт Глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», (107058, Москва, Глебовская ул., 20Б), старший научный сотрудник, Институт географии РАН, (119017, Москва, Старомонетный переулок, 29. e-mail: veronika.ginzburg@gmail.com).

Лытов Владислав Михайлович – научный сотрудник, ФГБУ «Институт Глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля», ORCID id- 0000-0002-4779- 8916, Researcher ID- S-4856-2018, (107058, Москва, Глебовская ул., 20Б, e-mail: vladislav.lytoff@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Maksimova – Cand. of Sci., Leading Scientific Researcher, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, ORCID id - 0000-0002-0569-8650, Scopus Author ID – 57201281760, ResearcherID – AAB-8632-2020, (107058, Moscow, Russia, 20 B, Glebovskaya St.), Associate Professor, Mathematics Department, Moscow Institute of Steel and Alloys, (119049, Moscow, Leninsky Prospekt 4, .e-mail: o-maximova@yandex.ru).

Veronika A. Ginzburg – Cand. of Sci., Head of Department, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and

Ecology, ORCID ID: 0000-0002-2082-5259, Scopus Author ID: 25723084200, Researcher ID: V-5071-2017, (107058, Moscow, Russia, 20 B, Glebovskaya St.), Senior Research Assistant, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, (119017, Moscow, Russia, 29, Staromonetny Lane, e-mail: veronika.ginzburg@gmail.com).

Vladislav M. Lytov – Scientific Researcher, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, ORCID ID: 0000-0002-4779-8916, Researcher ID: S-4856-2018 (107058, Moscow, Russia, 20 B, Glebovskaya St., e-mail: vladislav.lytoff@yandex.ru).

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

УДК 625.7/8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.А. Лунёв¹, Д.А. Разуваев², В.В. Голубенко³, М.Г. Чахлов⁴

^{1,3} ФГБОУ ВО СибАДИ,

Россия, г. Омск,

^{2,4} ФГБОУ ВО СГУПС,

Россия, г. Новосибирск

АННОТАЦИЯ

Введение. Большинство исследователей, занимающихся вопросами использования золошлаковых материалов (в особенности в строительной области), концентрируют свое внимание на вопросах определения механических характеристик или изучения особенностей их влияния на окружающую среду. В то же время проектирование автомобильных дорог с насыпями из грунтовых материалов в северных регионах требует обязательного учета поведения материала в суровых климатических условиях.

Хотя золошлаковые материалы являются типичным представителем дисперсных грунтовых материалов, они в некоторой степени подвержены морозному пучению (за счет особенностей внутренней структуры). Кроме того, данные материалы не были всесторонне исследованы при разработке стандартов и сводов правил РФ по проектированию дорог. По этим причинам в профессиональной среде развивается гипотеза о недопустимости применения золошлаков в насыпях автомобильных дорог из-за избыточного морозного пучения этого материала, что, по нашему мнению, является несколько некорректным упрощением.

Методика исследования. Для выяснения реальных свойств морозного пучения золошлаковых смесей специалистами СГУПС были проведены дополнительные исследования по определению относительных деформаций морозного пучения образцов среднезернистой и крупнозернистой ЗШС, а специалистами СибАДИ выполнено сопоставление полученных результатов с более ранними исследованиями по определению относительных деформаций морозного пучения образцов мелкозернистых ЗШС, а также проведен анализ всего массива полученных данных.

Результаты. В результате совместной работы получена эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать величину морозного пучения золошлакового материала в зависимости от его степени уплотнения, начальной влажности (при работе по закрытой схеме или влажности при промерзании по открытой системе), гранулометрического состава и температуры промораживания, что позволяет определить степень морозного пучения ЗШС по зерновому составу и расчетным характеристикам земляного полотна.

Заключение. На основе полученных результатов исследований и их анализа были выведены эмпирические зависимости для прогнозирования величины морозного пучения, которые требуют дополнительной опытной проверки на прочих видах ЗШС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, грунты, золошлаковые смеси, морозное пучение.

Поступила 06.10.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: А.А. Лунёв, Д.А. Разуваев, В.В. Голубенко, М.Г. Чахлов. Прогнозирование величины морозного пучения золошлаковых смесей для проектирования автомобильных дорог. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

© Лунёв А.А., Разуваев Д.А., Голубенко В.В., Чахлов М.Г.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

PREDICTING THE FROST HEAVING OF BOTTOM ASH VALUE FOR ROAD DESIGN

Aleksandr A. Lunev¹, Denis A. Razuvaev², Vladimir V. Golubenko³, Mikhail G. Chakhlov⁴

^{1,2}*Cand. of Sci., Head of the Technogenic Building Materials Studying Research Laboratory, SibADI, Omsk, Russia,*

^{2,4}*Engineer of the Quality control of road clothing and soil Research Laboratory, Siberian State Transport University Novosibirsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Most of the researchers dealing with the use of ash and slag materials (especially in the construction) have focused on the study of their mechanical characteristics or assessment of their impact on the environment. At the same time, the design of roads with embankments of soil materials in the Northern regions requires taking into account the behavior of materials in cold climates.

Although ash and slag materials are a typical dispersed soil, it is prone to frost heaving (due to the peculiarities of the internal structure). In addition, these materials have not been sufficiently tested in the development of the Russian Federation standards and codes for road design. Therefore, the professional environment is developing a hypothesis about the inadmissibility of using ash and slag materials in road embankments due to excessive frost heaving of this material, which, in our opinion, is not the case.

Methods of research. To obtain real values of ash and slag frost heaving, specialists of Siberian State Transport University carried out additional studies to determine the relative deformations of frost heaving of medium-grained samples and coarse-grained ash slabs. SibADI specialists compared the results obtained with earlier studies to determine the relative deformations of frost heaving of fine-grained ash slabs samples, and analyzed the entire array of data obtained.

Results. As a result of joint work, an empirical model was obtained that makes it possible to predict the amount of frost heaving of ash and slag material depending on its degree of compaction, initial moisture content (when working in a closed circuit or moisture in freezing through an open system), particle size distribution and freezing temperature. This makes it possible to determine the degree of frost heaving of ash and slag systems based on the grain size composition and the calculated characteristics of the subgrade.

KEYWORDS: construction, highways, soil, ash and slag mixtures, frost heave.

Submitted 06.10.20, revised 23.10.2020.

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: Aleksandr A. Lunev, Denis A. Razuvaev, Vladimir V. Golubenko, Mikhail G. Chakhlov. Predicting the frost heaving of bottom ash value for road design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

© Lunev A.A., Razuvaev D.A., Golubenko V.V., Chakhlov M.G.



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

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование автомобильных дорог в Российской Федерации невозможно без учета суровых климатических условий. Существенные отрицательные температуры воздуха в зимний период способствуют промораживанию грунта, в процессе которого увеличивается объем грунта в дорожной конструкции за счет явления морозного пучения [1]. Это, с одной стороны, вызывает существенные деформации дорожных одежд (а иногда и их разрушение) за счет достижения предельных деформаций, а с другой стороны, способствует снижению несущей способности грунтового основания в весенний период (за счет миграции влаги при промораживании) [2].

Подверженность грунтов морозному пучению, происходящему в насыпях земляного полотна при эксплуатации автомобильных дорог в северных регионах, является основополагающим фактором, влияющим на пригодность того или иного грунта, для использования в дорожной конструкции [3]. Испытания по определению относительной величины морозного пучения (являющейся характеристикой степени пучинистости) практически не проводят в связи с их дороговизной, сложностью, длительностью и отсутствием жестких требований действующих стандартов по их выполнению. Подход, который используется в инженерной практике РФ, когда степень пучинистости грунта определяется на основе таблиц, приведенных в своде правил 34.13330.2012, не обеспечивает требуемой точности проектирования, кроме того, для ряда нестандартных строительных материалов эти величины не приведены в СП.

Особенно остро эта ситуация стоит для золошлаковых смесей (которые согласно многочисленным исследованиям пригодны для строительства автомобильных дорог [4, 5, 6, 7, 8]), что отмечено исследованиями Е.В. Иванова и В.В. Сиротюка [9, 10, 11]. Помимо них и менее системно этой проблемой занимались специалисты ТГАСУ Фурсов и Балюра [12, 13]. Данными коллективами было отмечено, что золошлаковые смеси, как и прочие грунты, не подвержены пучению при испытаниях по закрытой системе и этот параметр может существенно изменяться в зависимости от условий испытания. Однако ни в одних, ни в других исследованиях не было отмечено достаточного числа экспериментальных данных для прогнозирования величины морозного пучения ЗШС в зависимости от условий промораживания.

Помимо вышеуказанных авторов проблемами изучения ЗШС занимались и другие исследователи, причем во времена существования СССР исследования велись практически независимо. Одни из первых исследований (за пределами нынешнего СНГ), посвященные оценке применения золошлаков как материала для строительства насыпей, были опубликованы в 1972 г. коллективом авторов А.М. DiGioia и W.L. Nuzzo [14]. В ходе опытов на приборах прямого среза и трёхосного сжатия ими была установлена пригодность ЗШС как материала для насыпей земляного полотна, а проведенные испытания по изучению вибрационных нагрузок на ЗШС показали высокую уплотняемость золы.

Более поздние исследования, проведенные Gray и Lin [15], были сконцентрированы на изучении изменения прочностных и физических характеристик золошлаков в зависимости от их зернового и химического составов, а также от формы частиц, слагающих смесь. Кроме того, в их исследовании поднимался вопрос пуццолановой активности золошлаков и их особенностей морозного пучения. К сожалению, несмотря на близкий характер выполненных исследований, они были проведены применительно к золам-уноса с электростанций штата Мичиган, которые обладают гидравлической активностью (из-за основной природы).

Коллективом авторов под руководством J.P. Martin [16] в 1990 г. опубликованы результаты исследований зол-уноса класса F (соответствующим согласно классификации РФ килым). Исследуемые материалы были отобраны на трёх электростанциях США (Delaware Valley: Pensilvania, New Jersey, Delaware) для дальнейшего определения возможных направлений их применения в дорожных насыпях. Эта работа затрагивала и вопросы морозного пучения, но весьма поверхностно. Однако авторами отмечено, что особенности структуры зольных частиц (пористых) позволяют формироваться кристаллам льда в массиве ЗШС таким образом, что не происходит выпучивания грунта. Такой эффект отмечается только, если влажность ЗШС меньше влажности при полной влагоемкости (есть свободные поры). Авторами были сделаны выводы, что для ликвидации пучения при существенном подтоке воды следует не использовать ЗШС в рабочем слое или выполнять гидроизоляцию массива ЗШС внутри конструкции.

Исследование R. Ossowski и K. Gwizdala [17] в рамках проекта Dredg Dikes, проводимо-

го в Польше, затрагивает основные аспекты прогнозирования устойчивости насыпного сооружения (дамбы) из ЗШС и её смеси с глинистым грунтом. Однако в [17], как и в статьях их коллег по проекту Dredg Dikes, L. Balochowski B Z. Sikora [18], Ossowski и Sikora [19], не учитывается влияние морозного пучения, хотя рассматриваются вопросы прочности и фильтрации.

В то же время изучение природных грунтов (и смесей на их основе [20]) и процессов, происходящих в них при промерзании, активно ведутся, например, в соседней Польше [21, 22] и Китае [23, 24], а также Канаде [25]. Поэтому, с нашей точки зрения, требуется вести работу, схожую с приведенной в [21, 22, 23, 24, 25], а учитывая большой опыт ранее проведенных исследований [9, 10, 11], целесообразно продолжать эксперименты с другими видами золошлаков.

МЕТОДЫ

В ходе исследования представлены результаты ранее проведенных исследований по оценке степени морозного пучения мелкозернистых ЗШС и выполнены новые исследования средне и крупнозернистых золошлаковых смесей.

В исследовании оценивалось морозное пучение ряда золошлаковых смесей, обладающих различным химическим составом. Данные по химическому составу приведены в таблице 1. Золошлаковые смеси Омской ТЭЦ-4 и Беловской ГРЭС относятся к мелкозернистыми и ранее были исследованы научным коллективом СИБАДИ, золошлаковые смеси Новосибирской ТЭЦ-3 относятся к средне – и крупнозернистым и были исследованы научным коллективом СГУПС в рамках разработки стандарта организации СТО 73116035-001–2019 «Материал золошлаковый, получаемый в результате деятельности новосибирской ТЭЦ-3, для дорожного строительства».

Согласно представленной в нормативных документах методике, для определения относительной деформации морозного пучения грунтов образцы необходимо испытывать при постоянном, свободном увлажнении нижней границы образца. Из-за этого огреха методики учет реальной величины морозного пучения в конструкции автомобильной дороги, как правило, не определяется, что ведет к необоснованному отказу от использования потенциально пучинистых грунтов на участках без избыточного увлажнения. Для ликвидации данного огреха было принято решение разделить исследование по изучению морозного пучения по открытой системе и по закрытой.

На первом этапе исследования изучали изменение относительной деформации морозного пучения в зависимости от начальной влажности золошлаковой смеси при фиксированном коэффициенте уплотнения и заданной температуре промораживания без подтока воды.

На втором этапе изучали изменение относительной деформации морозного пучения в зависимости от коэффициента уплотнения ЗШС и температуры промораживания при неограниченном подтоке воды к нижней границе образца.

Испытания первого этапа эксперимента моделировали закрытую систему, то есть имитировали рабочий слой земляного полотна в сухих условиях или в оболочке из гидроизоляции. На втором этапе исследования моделировали открытую систему, при которой неограниченный подток влаги к нижней части образца моделирует низкую насыпь в условиях избыточного увлажнения.

Испытание на морозное пучение обоими научными коллективами выполнялась согласно ГОСТ 28622. Однако для удобства повествования методы, использованные коллективами СИБАДИ и СГУПС, приведены отдельно в хронологическом порядке.

Таблица 1
Химический состав (по оксидам) золошлаковых материалов, % от сухой массы

Table 1
Chemical composition (by oxides) of bottom ash, % by dry weight

Место отбора	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	ППП ^а
Омская ТЭЦ-4	21.3-30.4	53.9-65.0	0.0	0.3-3.6	0.1-1.5	0.3-3.4	-	1.8-13.7	0.3	0.1-1.5	0.3-5.0
Новосибирская ТЭЦ-3	13.2	31.4	0.0	2.4	0.7	36.3	-	7.4	1.0	6.2	1.7-11.1
Беловская ГРЭС	18.8	58.9	-	0.25	0.9	5.5	-	7.2	2.7	2.4	5.3

ИССЛЕДОВАНИЯ СИБАДИ

Первые исследования, которые выполняли Е.В. Иванов и В.В. Сиротюк (с дальнейшим привлечением автора этой статьи [11]) на базе ФГБОУ ВО «СибАДИ», потребовали конструирования прибора для определения величины морозного пучения. Внутренняя часть прибора была выполнена в виде сборной формы из полипропиленовых колец (соединенных пазами) с внутренним диаметром 100 мм, каждое из которых имело высоту 20 мм. Собранный форма для хранения образца перед каждым испытанием устанавливалась в теплоизолирующий кожух из вспененного пенополиуретана (толщина стенки 80 мм, термическое сопротивление не ниже $2.1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Дж}$) с направляющими (для фиксации датчиков) и опорной частью с резервуаром для воды, который был соединен шлангом (теплоизолированным) с емкостью для воды за пределами климатической камеры (рисунок 1). Образцы ЗШС для испытания приготавливали в собранной форме из ПП колец методом стандартного уплотнения до установки в кожух. Более поздние исследования вели на стандартизированном измерителе степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт» НИЛ «ИТСМ» (см. рисунок 1).

Все испытания проводили без нагрузки на образцы. Для исключения влияния примерзания грунта к стенкам и снижения сил трения их выстилали полиэтиленовой пленкой.

Деформации морозного пучения в установке из сборных колец измеряли индикаторами часового типа ИЧ-10 с точностью 0,01 мм, а

в измерителе степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт» штатным датчиком с точностью 0,001 мм.

Закрытая система

Эксперименты, проводимые в закрытой системе, имели своей целью установить зависимость степени пучинистости (относительной деформации морозного пучения) от начальной влажности золошлаковой смеси. В экспериментах учет влажности выполнялся через параметр относительной влажности для возможного сопоставления результатов, полученных на разных ЗШС. Испытания выполнялись согласно методике, приведенной в ГОСТ 2862–2012, с некоторыми отличиями (не осуществлялся подток воды). Образцы ЗШС приготавливались при оптимальной влажности и степени уплотнения соответствующей коэффициенту уплотнения образца 0,99–1,00.

Открытая система

Во ходе экспериментального исследования в открытой системе использовалась методика ГОСТ 28622–2012, которая была несколько расширена. Помимо испытаний с температурой минус 4 °С, которая регламентирована ГОСТ, Е. В. Ивановым и В. В. Сиротюком [25] было выполнено математическое планирование двухфакторного эксперимента. Значения нулевых уровней факторов и интервалов варьирования приведены в таблице 2 (количество образцов в каждом опыте было не менее трёх) [25].



Рисунок 1 – Оборудование, использованное в опытах на базе ФГБОУ ВО СибАДИ:
а – установка для определения деформации морозного пучения;
б – измеритель степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт»

Figure 1 – The equipment used in the experiments on the base of SibADI:
a – equipment for assessing the degree of frost heaving;
b – device for measuring the degree of frost heaving УПГ-МГ4.01/2 “Grunt”

Таблица 2
Интервалы варьирования факторов

Table 2
Intervals of factors variation

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Коэффициент уплотнения $K_{упл}$	X_1	0.90	0.95	1.00	0.05
Относительная температура промораживания $t_{отн}, ^\circ\text{C}$	X_2	0.67	1	1.33	0.33

Таблица 3
Максимальная плотность и оптимальная влажность исследуемых ЗШС

Table 3
Maximum dry density and optimum moisture content of the bottom ashes

Характеристика	Тип-3 – Золошлаковая смесь среднезернистая	Тип-4 – Золошлаковая смесь крупнозернистая
Оптимальная влажность, %	46	21
Максимальная плотность скелета, г/см^3	1,13	1,80

В ходе исследования в климатической камере поддерживали стабильную температуру воздуха, требуемую для каждой точки интервала варьирования. Испытания проводили при температуре минус 4 °С, минус 6 °С и минус 8 °С. Каждый из образцов непосредственно перед началом цикла испытаний был выдержан в климатической камере (внутри эксикатора) одни сутки при температуре 1 °С.

ИССЛЕДОВАНИЯ СГУПС

Методика проведения исследований величины морозного пучения научным коллективом СГУПС соответствовала ГОСТ 28622–2012 и практически не отличалась от методики, примененной коллегами из СибАДИ. В качестве исследуемого материала использовались бурогольные золошлаковые смеси, отобранные на золошлакоотвале Новосибирской ТЭЦ-3. Величину морозного пучения определяли для схемы без подтока воды в зону промерзания (закрытой системе). Целью экспериментального исследования специалистов СГУПС было проведение анализа изменения относительной деформации морозного пучения ЗШС от начальной влажности образца. Учет влажности, так же как и в исследованиях коллектива СибАДИ, производится через показатель относительной влажности.

Величина морозного пучения определялась для золошлаков, отнесенных к Тип-3

(среднезернистая ЗШС с содержанием шлаковых частиц 28%) и Тип-4 (крупнозернистая ЗШС с содержанием шлаковых частиц 57%).

Перед началом исследования ЗШС на степень пучинистости для Тип-3 и Тип-4 по ГОСТ 22733–2016 определены максимальная плотность и оптимальная влажность. Результаты приведены в таблице 3. Образцы ЗШС приготавливались при оптимальной влажности и степени уплотнения, соответствующей коэффициенту уплотнения образца 0,99–1,00. После чего влажность образцов доводилась до необходимых в ходе испытания значений.

Для промораживания грунтов использовалась морозильная камера объемом 6 м³ (рисунок 2), которая обеспечивала одновременное испытание образца в трех повторностях.

В ходе испытаний образцы золошлаковой смеси устанавливали в специальную двойную обойму, выполненную из фторопласта (фторосодержащего полимера с крайне низкой поверхностной энергией). За счет этого поверхность обоймы практически не смерзается с грунтом и обеспечивает низкое трение, это позволяет золошлаковой смеси свободно перемещаться в обойме в процессе морозного пучения. Для этих же целей внутренняя форма (обойма) была выполнена из отдельных колец по 20 мм высотой, что добавляло подвижности образцу при пучении внутри сплошной наружной обоймы.



Рисунок 2 – Морозильная камера НИЛ «Геология, основания и фундаменты» СГУПС

Figure 2 – Freezer of the Research Laboratory “Geology, Foundations and Foundations”, Siberian State Railway University

Результаты исследований специалистов СГУПС и СибАДИ, полученные в рамках закрытой системы были приведены к одинаковому виду и приведены на рисунке 3.

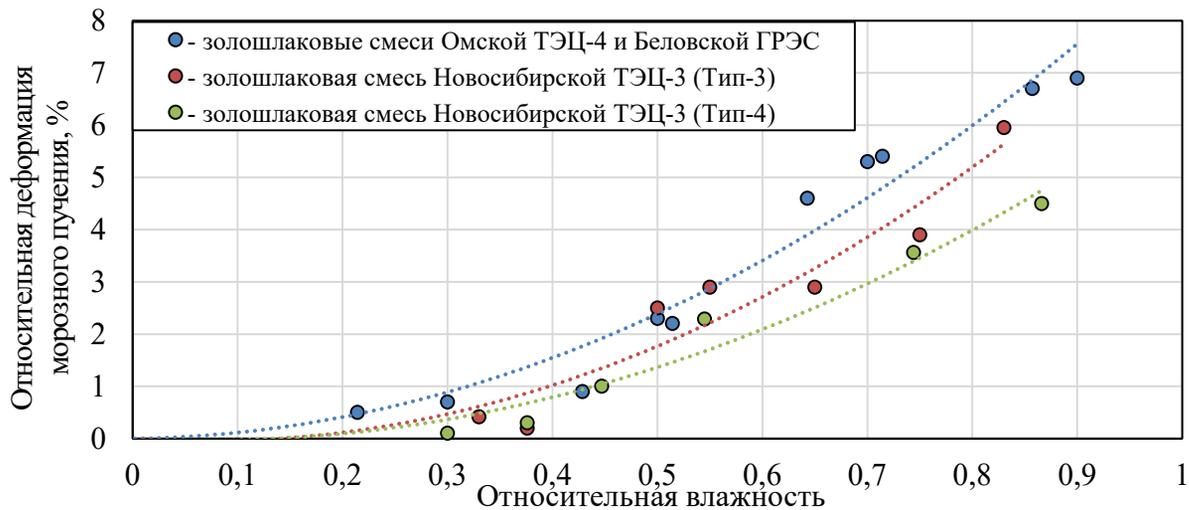


Рисунок 3 – Зависимости относительной деформации пучения от относительной влажности ЗШС

Figure 3 – Dependences of the relative frost heaving deformation on the relative moisture content of ash and slag materials

Как и в экспериментальном исследовании СибАДИ образец и внутренняя обойма находились в теплоизолирующем кожухе (теплоизоляция была выполнена из прессованного пенополистирола). Это техническое решение обеспечивало направленное промораживание от верхней границы образца в устройстве. В ходе испытания выполнялся контроль абсолютной деформации морозного пучения по индикатору часового типа с точностью до 0,01 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Закрытая система

Результаты исследований специалистов СГУПС и СибАДИ, полученные в рамках закрытой системы были приведены к одинаковому виду и представлены на рисунке 3.

Как можно заметить, независимо от происхождения золошлаковой смеси (её генезиса) золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от гигроскопической до оптимальной ЗШС относятся к непучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) и к слабопучинистым грунтам (по классификации СП 34.13330.2012); золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от оптимальной влажности до влажности при полной влагоёмкости, могут достигать значений относительной деформации морозного пучения, позволяющей отнести их к среднепучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) или пучинистым (по классификации СП 34.13330.2012); насыщение золошлаковых смесей водой до величины полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого (как по классификации СП 34.13330.2012, так и ГОСТ 25100–2011).

Анализ данных позволил вывести эмпирическую зависимость для прогнозирования величины относительной деформации морозного пучения золошлаковых смесей в зависимости от относительной влажности и содержания шлаковых частиц

$$\varepsilon = 4 \cdot W_{\text{отн}}^2 \cdot e^{1-\text{Ш}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{отн}}$ – фактическая влажность грунта; д.ед.;
Ш – содержание шлаковых частиц в долях от единицы.

Открытая система

В результате обработки полученных данных, Е. В. Ивановым была выведена корреляционная зависимость, проверка адекватности которой для принятого уровня доверительной вероятности (95%) показала адекватность. В раскодированном виде зависимость приведена авторами в следующем виде [26]:

$$\varepsilon_{\text{фн}} = 87,3 - 155,6K_{\text{упл}} - 7,3t_{\text{отн}} + 75K_{\text{упл}}^2 + 0,8t_{\text{отн}}^2 + 3K_{\text{упл}} \cdot t_{\text{отн}}. \quad (2)$$

Вывод общих зависимостей

В результате анализа полученных зависимостей (эмпирических) для прогнозирования относительной деформации морозного пучения золошлаковых смесей в зависимости от влажности, коэффициента уплотнения и температуры промораживания установлено, что возможно объединить зависимости (1) и (2). Это возможно за счет приведения результатов исследований, выполненных в условиях закрытой системы, к одной из точек интервала варьирования в открытой системе. Полученная в результате такой обработки математическая модель приведена ниже и может быть использована для закрытой системы:

$$\varepsilon_{\text{фн}} = \frac{4 \cdot W_{\text{отн}}^2 \cdot e^{1-\text{Ш}}}{100 \cdot \varepsilon_{\text{ф0}}} (87,3 - 155,6K_{\text{упл}} - 7,3t_{\text{отн}} + 75K_{\text{упл}}^2 + 0,8t_{\text{отн}}^2 + 3K_{\text{упл}} \cdot t_{\text{отн}}); \quad (3)$$

где $W_{\text{отн}}$ – влажность золошлаковой смеси, относительная;

$K_{\text{упл}}$ – коэффициент уплотнения золошлаковой смеси;

$t_{\text{отн}}$ – температура промерзания, относительная;

$\varepsilon_{\text{ф0}}$ – относительная деформация пучения золошлаковой смеси, полученная в ходе испытаний по открытой системе при постоянном коэффициенте уплотнения ($K_{\text{упл}}=1,0$) и относительной температуре промораживания ($t=0,67$).

Величина относительной деформации морозного пучения в (3), при значениях коэффициента уплотнения $K_{\text{упл}}=1,0$ и температуре $t=$ минус 4°С ($t_{\text{отн}}=0,67$) соответствует одной из точек планирования эксперимента Е.В. Иванова (при варьировании фактора X_1 на верхнем

уровне и фактора X_2 на нижнем уровне) [26]. Следовательно, при $K_{упл}=1,0$ и $t_{отн}=0,67$ справедливо выражение

$$\frac{(87,3-155,6K_{упл}-7,3t_{отн}+75K_{упл}^2+0,8t_{отн}^2+3K_{упл}\cdot t_{отн})}{\varepsilon_{f0}} = 1, \quad (4)$$

т.е. формула (3) превращается в эмпирическую зависимость (2).

Полученные зависимости (1) и (3) позволяют устанавливать величину морозного пучения ЗШС различного генезиса. Однако формула (3) является более полной и позволяет прогнозировать относительную деформацию морозного пучения в зависимости от гранулометрического состава, степени уплотнения, влажности и скорости промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было отмечено, что независимо от происхождения золошлаковой смеси (её генезиса) имеют место следующие закономерности:

- золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от гигроскопической до оптимальной ЗШС, относятся к непучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) и к слабопучинистым грунтам (по классификации СП 34.13330.2012);

- золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от оптимальной влажности до влажности при полной влагоёмкости, могут достигать значений относительной деформации морозного пучения, позволяющей отнести их к среднепучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) или пучинистым (по классификации СП 34.13330.2012);

- насыщение золошлаковых смесей водой до величины полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого (как по классификации СП 34.13330.2012, так и ГОСТ 25100–2011).

Кроме того, было выявлено, что величина морозного пучения ЗШС различного генезиса зависит от:

- гранулометрического состава;
- степени уплотнения;
- влажности материала;
- скорости промерзания.

Также установлена степень влияния этих факторов на величину морозного пучения.

На основе полученных результатов исследований и их анализа были выведены эмпирические зависимости для прогнозирования величины морозного пучения, которые требуют дополнительной опытной проверки на прочих видах ЗШС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang L., Sihong L., Eduardo A., Liujiang W., Lei X., Zhuo L. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 157. Pp. 206-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.008>.
2. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways // *MATEC Web of Conferences*. X. 2018. Vol. 239. 05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>.
3. Talamucci F. Freezing processes in porous media: Formation of ice lenses, swelling of the soil // *Mathematical and Computer Modelling*. 2003. Vol. 37. Iss. 5-6. Pp. 595-602. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)00053-0).
4. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 35. Pp. 681-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.067>.
5. Haleema A., Luthrab B., Mannana S., Khuranaa S. Kumarc Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective // *Resources Policy*. 2016. Vol. 49. Pp. 334-348. DOI: [10.1016/j.resourpol.2016.07.002](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).
6. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1558-1562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.
7. Seymour J., Bozok O., Hughes A., Bodine B. Condition of coal ash embankments [Electronic resource] // *2015 World of Coal Ash (WOCA) : Conference in Nashville, TN, May 5-7. 2015*. Pp. 1-27. URL: <http://www.flyash.info/2015/028-seymour-2015.pdf> (date of reference: 05.10.2020).
8. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: [10.24411/1728-323X-2019-14077](https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077).
9. Сиротюк В.В., Иванов Е.В., Шевцов В.Р. Результаты мониторинга опытного участка земляного полотна автодороги из золошлаковой смеси [Электронный ресурс] // *Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование: материалы IV Международного научно-практического семинара*. М.: Издательский дом МЭИ. 2012. С. 85-88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29056375> (дата обращения: 05.10.2020).
10. Иванов Е.В., Исаков А.Л., Сиротюк В.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси [Электронный ресурс] // *Вестник СибАДИ*. 2013. Выпуск 3 (31). С. 71-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19032655> (дата обращения: 05.10.2020).
11. Сиротюк В.В., Лунёв А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // *Автомобильные дороги*. 2016. № 6(1015). С. 72-79.

12. Фурсов В.В., Балюра М.В. Исследование морозостойчивости золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1. С. 242-252.
13. Балюра М.В. Исследование строительных свойств золы Томской ГРЭС-2 // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии, оснований и фундаментов. Томск : Изд-во ТГУ, 1988. С. 97-104.
14. DiGioia A.M., Nuzzo W.L. Fly Ash as Structural Fill // Journal of Power Division. 1972. Vol. 98. Iss. 1. Pp. 77-92.
15. Gray D.H., Lin Y. K. Engineering Properties of Compacted Fly Ash // Soil Mechanics and Foundation Engineering Division. 1972. Vol. 98. No. 4. Pp. 361-380.
16. Martin J.P., Collins B.J., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments // Energy. 1990. Vol. 116(2). Pp. 71-86.
17. Ossowski R., Gwizdala K. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. Pp. 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.129>.
18. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1029-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.130>.
19. Balachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of fly ash – dredged material mixtures on laboratory test // Studia Geotechnica et Mechanica. 2013. Vol. 35(3). Pp. 3-11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026.
20. Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A., Al-Mukhtar M. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 119. Pp. 151-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>.
21. Cwiakala M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses // Transportation research procedia. 2016. Vol.14. Pp. 3476-3484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.312>.
22. Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory Examination of Frost-Heaving Properties of Road Unbound Mixtures Based on Fines Content and Plasticity Index // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. Pp. 836-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.136>.
23. Yangsheng B., Xiaoyan D., Qianli Z., Jinfei C. Frost Heave Deformation Analysis Model for Microheave Filler. [Electronic resource] // Geotechnical Engineering. Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. April 9th. Pp. 1-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82575>. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/188c/f12c6c4977aa56efefaf0d9112cd0231d3c6.pdf> (date of reference: 05.10.2020).
24. Pingsheng W., Guoqing Z. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Issues 2. Pp. 287-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.003>.
25. Liu H., Maghoul P., Shalaby A., Bahari A. Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Frost Heave Using the Theory of Poroelasticity for Frost-Susceptible Soils in Double-Barrel Culvert Sites // Transportation Geotechnics. 2019. Vol. 20. 100251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100251>.
26. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима. Омск, 2015. 165 с.

REFERENCES

1. Yang L., Sihong L., Eduardo A., Liujiang W., Lei X., Zhuo L. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2019; 157: 206-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.008>.
2. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways. *MATEC Web of Conferences*. X. 2018. 239. 05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>.
3. Talamucci F. Freezing processes in porous media: Formation of ice lenses, swelling of the soil. *Mathematical and Computer Modelling*. 2003; 37 (5-6): 595-602. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)00053-0).
4. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35: 681-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.067>.
5. Haleema A., Luthrab B., Mannana S., Khurana S. Kumarc Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective. *Resources Policy*. 2016; 49: 334-348. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.07.002.
6. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1558-1562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.
7. Seymour J., Bozok O., Hughes A., Bodine B. Condition of coal ash embankments. *2015 World of Coal Ash (WOCA) : Conference in Nashville 5-7. 2015. 1-27. URL: http://www.flyash.info/2015/028-seymour-2015.pdf* (date of reference: 05.10.2020).
8. Pichugin E.A. Analiticheskij obzor nakoplennoho v Rossijskoj Federacii opyta vovlecheniya v hozyajstvennyj oborot zoloshlakovyh othodov teploelektrostantsij [Analytical review of the experience of involving ash slag waste of thermal power plants in economic circulation in the russian federation]. *Problemy regional'noj ekologii*. 2019; 4: 77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. (in Russian)
9. Sirotyuk V.V., Ivanov E.V., Shevcov V.R. Rezul'taty monitoringa opytnogo uchastka zemlyanogo polotna avtodorogi iz zoloshlakovoj smesi [Elektronnyj resurs]. *Zoloshlaki TES: udalenie, transportirovka, pererabotka, skladirovanie : materialy IV Mezhdunarod-*

nogo nauchno-prakticheskogo seminar. Moscow, Izdatel'skij dom MEI. 2012. 85-88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29056375> (data obrashcheniya: 05.10.2020). (in Russian)

10. Ivanov E.V., Isakov A.L., Sirotyuk V.V. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie promerzaniya zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoj smesi [Experimental study and mathematical modeling of roadbed freezing made of ash mixture] [Elektronnyj resurs]. *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 71-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19032655> (data obrashcheniya: 05.10.2020). (in Russian)

11. Sirotyuk V.V., Lunyov A.A., Ivanov E.V. Zoloshlakovaya smes' dlya zemlyanogo polotna. *Avtomobil'nye dorogi*. 2016; 6(1015): 72-79. (in Russian)

12. Fursov V.V., Balyura M.V. Issledovanie morozoustojchivosti zoloshlakovykh othodov teplovykh elektrostancij dlya celej stroitel'stva [Research of frost resistance of ashes and slag waste of thermal power stations for construction purposes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013; 1: 242-252. (in Russian)

13. Balyura M.V. Issledovanie stroitel'nykh svoystv zoly Tomskoj GRES-2. *Problemy gidrogeologii, inzhenernoj geologii, osnovanij i fundamentov*. Tomsk, Izd-vo TGU, 1988. 97-104. (in Russian)

14. DiGioia A.M., Nuzzo W.L. Fly Ash as Structural Fill. *Journal of Power Division*. 1972; 98(1): 77-92.

15. Gray D.H., Lin Y. K. Engineering Properties of Compacted Fly Ash. *Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. 1972; 98(4): 361-380.

16. Martin J.P., Collins B.J., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments. *Energy*. 1990; 116(2): 71-86.

17. Ossowski R., Gwizdala K. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite. *Procedia Engineering*. 2017; 172: 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.129>.

18. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites. *Procedia Engineering*. 2013; 57: 1029-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.130>.

19. Balachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of fly ash - dredged material mixtures on laboratory test. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2013; 35(3): 3-11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026.

20. Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A., Al-Mukhtar M. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; 119: 151-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>.

21. Cwiakala M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses. *Transportation research procedia*. 2016; 14: 3476-3484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.312>.

22. Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory Examination of Frost-Heaving Properties of Road Unbound Mixtures Based on Fines Content and Plasticity Index. *Procedia Engineering*. 2016; 143: 836-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.136>.

23. Yangsheng B., Xiaoyan D., Qianli Z., Jinfei C. Frost Heave Deformation Analysis Model for Microheave Filler. [Electronic resource]. *Geotechnical Engineering. Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019. 1-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82575>. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/188c/f12c6c4977aa56efefaf0d9112cd0231d3c6.pdf> (date of reference: 05.10.2020).

24. Pingsheng W., Guoqing Z. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28 (2): 287-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.003>.

25. Liu H., Maghoul P., Shalaby A., Bahari A. Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Frost Heave Using the Theory of Poroelasticity for Frost-Susceptible Soils in Double-Barrel Culvert Sites. *Transportation Geotechnics*. 2019; 20: 100251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100251>.

26. Ivanov E.V., Obosnovanie primeneniya zoloshlakovykh smesey dlya stroitel'stva zemlyanogo polotna s uchetom vodno-teplovogo rezhima [Justification of the use of ash and slag mixtures for the construction of a roadbed, taking into account the water-thermal regime]. Omsk, 2015. 165 p. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук, руководитель НИЛ «ИТСМ», доц. кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, тел. 8-999-453-39-30; e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

Разуваев Денис Алексеевич – канд. техн. наук, заведующий НИЛ «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна», доц. кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

Голубенко Владимир Владимирович – канд. техн. наук, директор ООО «АДМ», доц. кафедры «Проектирование дорог», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (644008, г. Омск, пр. Мира, 5).

Чахлов Михаил Геннадьевич – инженер НИЛ «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Lunev (Omsk, Russia) - Cand. of Sci., Head of the Technogenic Building Materials Studying Research Laboratory, Associate Professor of the Road Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Prospect Mira, 5, tel. : 8-999-453-39-30; email: lunev.al.al@gmail.com).

Denis A. Razuvaev (Novosibirsk, Russia), Cand. of Sci., Head of the Quality Control of Road Clothing and Soil Research Laboratory, Associate Professor of the Research, Design and Construction of iron and

steel Roads Department, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk region, Novosibirsk, Dusi Kovalchuk st., 191).

Vladimir V. Golubenko (Omsk, Russia), Cand. of Sci., Associate Professor, Road Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Prospect Mira, 5).

Mikhail G. Chakhlov (Novosibirsk, Russia), Engineer of the Quality control of road clothing and soil Research Laboratory, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk Region, Novosibirsk, Dusi Kovalchuk st., 191).

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ФУНКЦИЙ

Ю.В. Краснощеков
ФГБУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
uv1942@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет конструкций полувероятностным методом предельных состояний не даёт ответа на вопрос, насколько конструкция надёжна. Вероятностные методы пока еще несовершенны и попытки применить их для оценки надежности конструкций, рассчитанных по предельным состояниям, иногда приводят к противоречивым результатам. Возможной причиной этого является недостаточная изученность влияния асимметрии функций распределения переменных на теоретическую надежность конструкций. Цель исследования – разработка практического метода расчета надежности конструкций с учетом асимметрии функций распределения и апробирование метода при оценке надежности изгибаемых железобетонных элементов.

Материалы и методы. Надежность конструкций оценивается по изменчивости функции резерва прочности на основе методов моментов и проектных точек. Предлагается способ приближенной оценки надежности достаточно сложных композиций случайных величин с использованием статистических параметров (математического ожидания, стандартного отклонения и коэффициента асимметрии) двухэлементных функций, аппроксимированных логнормальным трехпараметрическим распределением.

Выводы. Учет коэффициента асимметрии системы переменных при вероятностном расчете позволяет обосновать надежность изгибаемого железобетонного элемента, запроектированного по предельным состояниям. На примере расчета предлагаемым способом показано, что обеспеченность расчетных значений несущей способности железобетонного элемента по нормальному сечению, независимо от того, определены эти значения по усилиям в сжатом бетоне или растянутой арматуре, практически одинакова. При положительной асимметрии результаты расчета с применением нормального распределения могут быть значительно заниженными. Сделан вывод о том, что величина коэффициента асимметрии системы переменных может быть обоснованием применения нормального или логнормального распределения для оценки надежности конструкций. Пренебрежение асимметрией переменных при вероятностном расчете может существенно исказить оценку надежности конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, предельное состояние, расчетная точка, асимметрия логнормального распределения, вероятностный расчет.

Поступила 02.10.20, принята к публикации 23.10.2020.

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: Краснощеков Ю.В. Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650>

© Краснощеков Ю.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650>

PROBABILITY CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES CONSIDERING ASYMMETRY OF RANDOM VALUES AND FUNCTIONS DISTRIBUTION

Yuri V. Krasnoshchekov

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

ABSTRACT

Introduction. The calculation of structures by the semi-probability method of limit states does not answer the question how reliable the construction is. Probabilistic methods are still imperfect, and attempts to use them to evaluate structures reliability calculated with limit states sometimes lead to contradictory results. A possible reason for this is the lack of research on the influence of the asymmetry of variable distribution functions on the theoretical reliability of structures. The purpose of the research is to develop a practical method for calculating the reliability of structures with considering the asymmetry of the functions distribution and to test the method for evaluating the reliability of bent reinforced concrete elements.

Materials and methods. The reliability of structures is estimated by the variability of the strength reserve function based on the methods of moments and design points. A method is proposed for approximating the reliability of fairly complex compositions of random variables using statistical parameters (expectation, standard deviation, and skewness coefficient) of two-element functions approximated by a lognormal three-parameter distribution.

Conclusions. Considering the coefficient of the values system asymmetry in the probability calculation allows to justify the reliability of the bent reinforced concrete element designed according to the limit states. On the example of the calculation with the proposed method shown that the availability of the calculation values of the bearing strength of the reinforce concrete element in normal cross section is equal despite the values of the forces in the pressed reinforce concrete or positive reinforcement are indicated. If there is a positive asymmetry, the calculation results using the normal distribution may be significantly underestimated. It is concluded that the value of the asymmetry coefficient of the system of variables can be a justification for the use of normal or lognormal distribution for evaluating the reliability of structures. Ignoring the asymmetry of variables in probabilistic calculations can significantly distort the assessment of the reliability of structures.

KEYWORDS: reliability, limit state, design point, lognormal distribution asymmetry, probability calculation.

Submitted 02.10.20, revised 23.10.2020.

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: Krasnoshchekov Yuri V. Probability calculation of building structures considering asymmetry of random values and functions distribution. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650>

© Krasnoshchekov Y.V.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. При вероятностных расчетах рассматриваются случайные величины и функции, распределенные по разным законам, зачастую неизвестным. Эта неопределенность ориентирует проектировщика на теоретические методы оценки надежности и умение оперативного её определения. Упрощенные процедуры расчета позволяют выполнить оперативную оценку конструктивной надежности с использованием вероятностных концепций.

Цель исследования – разработка практического метода расчета надежности конструкций с учетом статистической изменчивости переменных и апробирование метода при оценке надежности изгибаемых железобетонных элементов.

2. На современном этапе надежность конструкций обеспечивается расчетами по методу предельных состояний, который в России реализован без численной оценки вероятности безотказной работы, что является очевидным недостатком норм проектирования. Для оценки надежности конструкций можно применять метод расчетных точек на базе индекса надежности, как это принято стандартом EN 1990. Но подход, принятый EN, основан на распределении переменных по нормальному закону, в то время как временные нагрузки распределены по асимметричным законам. Предлагается способ оценки надежности достаточно сложных композиций случайных величин с последовательной реализацией статистических параметров двухэлементных функций, аппроксимированных логнормальным трехпараметрическим распределением. При положительной асимметрии результаты расчета с применением нормального распределения, как показано на примере, могут быть значительно заниженными.

3. Учет коэффициента асимметрии системы переменных при вероятностном расчете позволяет обосновать надежность изгибаемого железобетонного элемента, запроектированного по предельным состояниям. На примере расчета предлагаемым способом показано, что обеспеченность расчетных значений несущей способности железобетонного элемента по нормальному сечению, независимо от того, определены эти значения по усилиям в сжатом бетоне или растянутой арматуре, практически

одинакова. Сделан вывод, что пренебрежение асимметрией переменных при вероятностном расчете может существенно исказить оценку надежности конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Реальные условия эксплуатации конструкций зданий и сооружений могут значительно отличаться от тех, которые принимаются на стадии проектирования и базируются на предположениях и допущениях. Основным инструментом выхода из этой неопределенности является расчет в сочетании с конструированием. Расчетная модель строительных конструкций согласно концепции проектирования должна содержать комплекс базовых переменных, представляющих собой физические параметры, которые соответствуют нагрузкам и воздействиям внешней среды, свойствам материалов и грунтов, а также геометрическим параметрам¹.

Основной целью расчетов является обеспечение адекватного уровня надежности с применением двух возможных подходов: вероятностного метода или метода частных коэффициентов, привязанного к предельным состояниям конструкций. Существует тенденция к постепенному переходу к вероятностным методам расчета, поскольку путь обеспечения надежности зависит от огромного числа факторов, связанных с эксплуатацией конструкции и влияние которых невозможно оценить частными коэффициентами метода предельных состояний [1]. К тому же полувероятностный метод предельных состояний, который регламентирует ГОСТ 27751, не даёт ответа на вопрос, насколько конструкция надёжна.

Российские нормы проектирования допускают возможность полного вероятностного расчёта конструкций по заданному значению надёжности при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов (базовых переменных), входящих в расчётные зависимости. При этом различают изменчивость статистическую, обусловленную случайными факторами, системную в виде, например, изменчивости температурных воздействий, связанных с сезонным фактором, и естественную, являющуюся, в частности, следствием усталости материалов.

Основными характеристиками статистической изменчивости, которая рассматривается

¹ ГОСТ Р ИСО 2394–2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. М. : Стандартинформ, 2016. 66 с.

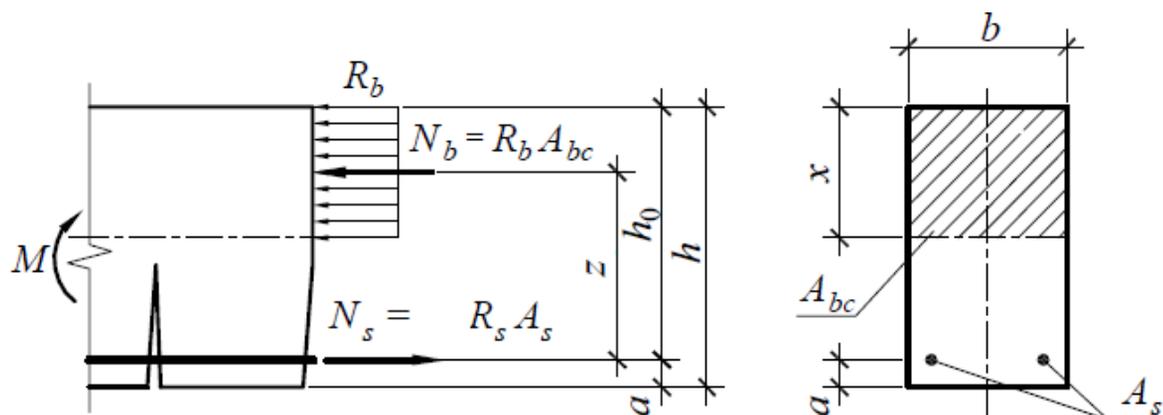


Рисунок 1 – Схема усилий в нормальном сечении железобетонного элемента

Figure 1 – Diagram of forces in the normal section of a reinforced concrete element
Источник: составлено автором на основе норм проектирования

в данной статье, являются числовые параметры, характеризующие степень рассеяния возможных значений случайной величины относительно центра распределения: дисперсия, среднее квадратичное (стандартное) отклонение и коэффициент вариации [2]. Пока вероятностные методы не вошли в обычную практику расчета конструкций, учет изменчивости базовых переменных осуществляется косвенным путем через коэффициенты надежности метода предельных состояний. Разработаны и применяются в исследованиях надежности строительных конструкций методы вероятностного расчета, реализация которых из-за сложности вычислений возможна только в виде специальных и малодоступных программных средств. В России характеристики изменчивости переменных, как и методы оценки надежности конструкций из различных строительных материалов, пока еще не нормируются, поэтому вероятностные методы расчета применяются только в исследованиях [3, 4, 5]. Некоторые сведения об изменчивости нагрузок и свойств материалов, а также о способах оценки характеристик изменчивости можно найти в книгах [6, 7, 8, 9]. Ощущается недостаток практических методов расчета строительных конструкций с учетом изменчивости, которые необходимы для проектирования массовых конструкций и обучения студентов. Только выполняя вероятностный расчет практическим методом, проектировщик сможет понять важность полнейшего учета изменчивости расчетных параметров и обосновать

применение недорогой программной продукции при проектировании ответственных сооружений.

Вероятностные методы пока еще несовершенны и попытки применить их для оценки надежности конструкций, рассчитанных по предельным состояниям, иногда приводят к противоречивым результатам.

Известно, например, что прочность изгибаемых железобетонных конструкций по нормальным сечениям определяется парой расчетных сил, действующих в растянутой арматуре N_s и в сжатой зоне бетона N_b (рисунок 1).

В предельном состоянии принимается статическое условие равновесия $N_s = N_b$. Очевидно, надежность статически определимой конструкции зависит от изменчивости сопротивлений арматуры и бетона. Поскольку железобетонная конструкция проектируется так, чтобы разрушение не происходило по арматуре, поэтому считается, что надежность по нормальному сечению характеризуется в основном обеспеченностью расчетного сопротивления бетона сжатию [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Такая вероятностная оценка прочности противоречит равенству расчетных значений $N_s = N_b$. Противоречие пытались устранить введением корректирующих коэффициентов [15], в том числе коэффициента сочетания свойств нескольких материалов [12]. Однако такой подход только усложняет вероятностный расчет, поскольку требует вероятностной оценки самих коэффициентов.

Надежность конструкций часто оценивают по изменчивости функции резерва прочности в виде условия

$$S = R - F \geq 0, \quad (1)$$

где R и F – случайные величины сопротивления конструкции и нагрузочного эффекта, имеющие одинаковые размерности..

Предполагается, что величины R и F являются независимыми переменными с нормальным распределением. Очевидным недостатком нормального распределения является его симметричность. Большинство теоретических и часто опытных распределений характеризуются наличием значительной асимметрии [2, 6]. В настоящее время проектировщик не располагает способами оперативного учета асимметрии.

Цель исследования – разработка практического метода расчета надежности конструкций с учетом статистической изменчивости переменных и апробирование метода при оценке надежности изгибаемых железобетонных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными вероятностными (статистическими) характеристиками функции (1) являются математическое ожидание $m_S = m_R - m_F$ и дисперсия $s_S^2 = s_R^2 + s_F^2$.

Базовой оценкой и стандартным критерием надежности конструкций во многих странах принят индекс надежности или показатель безопасности β [16]. Величина β , названная коэффициентом безопасности или индексом надежности, определяется из соотношения статистических параметров функции (1) по формуле

$$\beta = \frac{m_S}{s_S} = \frac{m_R - m_F}{\sqrt{s_R^2 \pm 2\rho s_R s_F + s_F^2}}. \quad (2)$$

В формуле (2) коэффициент ρ учитывает положительную или отрицательную корреляцию переменных. Если R и F статистически независимые переменные, то $\rho = 0$ [17].

Коэффициент β является характеристикой стандартизированной вероятности случайной величины S , соответствующей условию $S = 0$. Вероятность отказа или вероятность отрицательного значения резерва прочности S при известном значении β определяется из формулы

$$P_F = P(S < 0) = 1 - \Phi(\beta), \quad (3)$$

где $\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ – интеграл вероятности или функция Лапласа переменной $u = (S - m_S)/s_S$, соответствующей стандартной функции $\Phi(u)$.

Вероятность безотказной работы или надёжность конструкции $P_R = 1 - P_F$.

Метод оценки надежности посредством коэффициента β получил название метода двух моментов, поскольку для его определения используются по две характеристики случайных переменных R и F . Если величины R и F преобразовать в переменные с нормальным распределением, то коэффициент безопасности в виде выражения (2) можно рассматривать в качестве характеристики надёжности конструкции практически при любых законах распределения независимых величин R и F . Метод двух моментов относят к аналитическим методам расчета надежности первого или второго порядка [16].

В европейских нормах (Еврокод) метод моментов принят в качестве базового метода оценки надежности конструкций [18]. Модифицированный метод двух моментов для расчета на заданную надежность получил название метода проектных точек. Наглядное представление о проектных точках и индексе надежности можно получить из графического изображения случайных переменных в виде двумерной диаграммы на осях F/s_F и R/s_R (рисунк 2).

На рисунке 1 функция распределения двух случайных величин $S = R - F$ представлена в виде семейства окружностей равной плотности, являющихся горизонталями поверхности распределения. Функция предельного состояния $S = 0$ показана в виде границы разрушения, которая является геометрическим местом критических (расчетных) точек.

Ввиду нелинейности очертания границы разрушения в общем случае, положение расчетных точек определяется путем последовательных приближений с использованием линеаризованных функций. В книге [8] показан алгоритм такого расчета методом «горячих» точек.

Определенные в первом приближении расчетные значения переменных R и F соответствуют координатам R/s_R и F/s_F расчетной точки K , расположенной на кратчайшем расстоянии β от исходной точки O стандартизованного нормального распределения до линии разрушения. При этом расчётные значения

нагрузочного эффекта и несущей способности метода частных коэффициентов (аналог метода предельных состояний) получают из зависимостей

$$R = m_R - \alpha_R \beta S_R, \quad (4)$$

$$F = m_F + \alpha_F \beta S_F. \quad (5)$$

Коэффициенты чувствительности переменных R и F определяются по формулам $\alpha_R = S_R / \sqrt{S_F^2 + S_R^2}$; $\alpha_F = S_F / \sqrt{S_F^2 + S_R^2}$.

Метод расчетных точек относят к вероятностному методу расчета, основанному на требовании выполнения условий $P_R \geq P_F$ или $\beta \geq \beta_d$ (предельные значения β_d установлены EN 1990). В частности, значениям требуемых индексов надежности для предельных состояний по несущей способности $\beta_d = 3,8$ и пригодности к эксплуатации $\beta_d = 1,5$ соответствуют вероятности разрушения $P_d = 7,2 \cdot 10^{-5}$ и $P_d = 6,7 \cdot 10^{-2}$. Эти значения

P_d относятся к расчетному сроку эксплуатации 50 лет, который устанавливается для конструкций зданий и сооружений общего назначения.

Относительно простой расчет надежности методом двух моментов усложняется тем, что случайные величины R и F в общем случае являются функциями большого числа параметров, изменчивость которых может иметь случайный характер. Нормирование характеристик величин R и F практически невозможно из-за сложности их эмпирического обоснования, взаимосвязи и взаимозависимости параметров. Нормируются статистические характеристики лишь основных (базовых) переменных.

Базовыми переменными функции сопротивления конструкции R обычно являются сопротивление материалов и некоторые геометрические параметры, изменчивость которых характеризуется соответствующими допусками (допускаемыми отклонениями от средних значений).

Граница разрушения

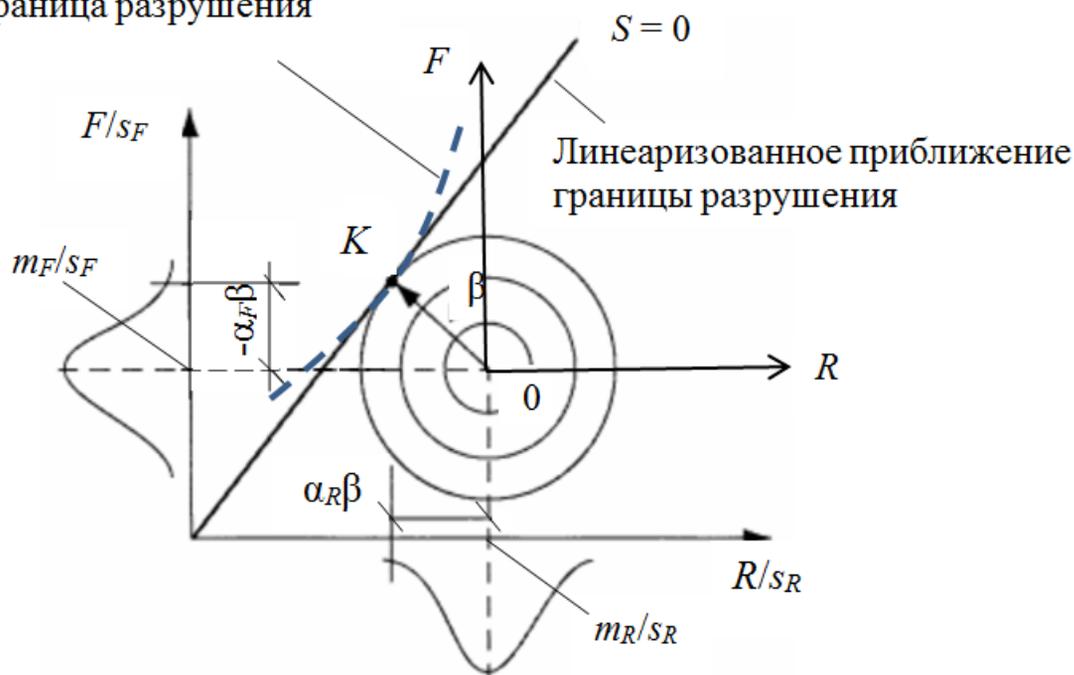


Рисунок 2 – Проектные точки и индекс надежности по EN 1990 (при нормальном распределении некоррелированных параметров)

Figure 2 – Design points and reliability index according to EN 1990 (at normal distribution of uncorrelated parameters)

Источник: заимствовано [18] с авторским дополнением элементами диаграммы

Таблица 1
Вероятностные модели нормативных нагрузок

Table 1
Recommended EN 1990 minimum values of reliability indices

Нагрузка	Вероятностная модель
Постоянная	Распределение случайной величины
Снеговая	Последовательность годовых максимумов
Ветровая	Последовательность месячных максимумов
Гололёдная	Последовательность годовых максимумов
Крановая	Нормальный стационарный процесс

Представление о базовых переменных функции некоторых нагрузок F , действующих на здания и сооружения, можно получить по особенностям вероятностных моделей, приведенным в таблице 1.

Распределения постоянных и длительных временных нагрузок, как правило, близки к нормальному закону. Законы распределения кратковременных нагрузок нередко связаны не только с их видом, но и с типом конструкций, а также с условиями эксплуатации сооружений.

Статистические характеристики функций R и F зависят от изменчивости базовых переменных, но поскольку базовые переменные обычно связаны с другими величинами, необходим инструмент для оценки статистических характеристик функций. Сопротивление конструкции и нагрузочный эффект могут быть заданы как функции $Z(X, Y, C, \dots)$, аргументы которых могут быть случайными и детерминированными величинами. При наличии случайных аргументов результирующую функцию можно рассматривать как случайную величину, характеристики которой получают из соответствующих характеристик основных переменных.

Следует отметить, что характеристика безопасности в виде индекса надежности β обладает рядом недостатков, наиболее существенный из которых – симметричность относительно среднего m_x и асимптотическое продолжение в область отрицательных значений случайной величины с бесконечными пределами распространения в обе стороны. В определенной степени этого недостатка лишены несимметричные распределения с положительной или отрицательной асимметрией α (для нормального распределения $\alpha = 0$). Учитывать асимметрию, например, рекомендуют Евроноормы для определения свойств материала. Кроме этого, распределение вероят-

ностей несущей способности и нагрузочного эффекта (или их составляющих) могут отличаться от нормального распределения. Для этих случаев необходимо иметь доступную процедуру преобразования исходного распределения в нормальное, чтобы воспользоваться оценкой надежности с помощью коэффициента β .

Достаточно простой является процедура преобразования логнормального распределения, которое применяется обычно для описания свойств основных строительных материалов и отличается от нормального тем, что учитывает изменчивость случайных величин в области значений от 0 до ∞ .

При наличии существенной асимметрии чаще всего применяется трехпараметрическое логнормальное распределение. Логнормальное распределение, определенное на полубесконечном интервале, обычно описывается тремя параметрами: среднее значение, дисперсии, а также нижнее или верхнее предельное значение или коэффициент асимметрии. Для свойств материалов коэффициент асимметрии может находиться в пределах (0, 1). Для воздействий коэффициент асимметрии может быть даже больше единицы. Логнормальное распределение близко к нормальному, если коэффициент асимметрии $\alpha \approx 0$ и абсолютное предельное значение стремится к бесконечности (очень большое). Параметры логнормального двухпараметрического распределения получают из зависимостей

$$\sigma_X = \sqrt{\ln(1 + v_X^2)} \text{ и } \mu_X = \ln m_X - \sigma_X^2 / 2 = \ln m_X - \ln \sqrt{1 + v_X^2}. \quad (6)$$

Известно, что если коэффициент асимметрии отрицательный ($\alpha < 0$), то показатели логнормального распределения ниже (небла-

поприятны) показателей нормального распределения. При положительном коэффициенте асимметрии ($\alpha > 0$) показатели логнормального распределения выше (благоприятны) показателей нормального распределения. Расхождение показателей увеличивается при увеличении коэффициента вариации и уменьшении квантиля вероятности. Если истинная асимметрия невелика, например $|\alpha_x| < 0,13$, нормальное распределение является хорошим приближением, т.е. влиянием асимметрии можно пренебречь [2].

Опыт проектирования показывает, что статистические параметры случайных величин и функций можно представить в виде, обеспечивающем удовлетворительную аппроксимацию трехпараметрическим логнормальным распределением [19].

В таблице 2 приведены выражения статистических параметров двумерных функций $Z(X, Y)$ независимых случайных величин, которые можно применить для приближенной вероятностной оценки сопротивлений конструкций и нагрузочных эффектов (случайные величины выделены полужирным шрифтом).

Коэффициент асимметрии табличной функции $aX + b$ определяется в зависимости от коэффициента вариации v_x по формуле [20]:

$$\alpha_x = (\text{exp} s_x^2 + 2) \sqrt{\text{exp} s_x^2} \div 1. \quad (7)$$

При $v_x < 0,2$ коэффициент асимметрии можно приближенно вычислить по формуле

$$\alpha_x = 3v_x + v_x^3. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим для примера железобетонную балку пролетом $l_0 = 6$ м.

Функция прочности балки с одиночным армированием по нормальному сечению прямоугольной формы шириной b и рабочей высотой h_0 , базовыми переменными которой обычно принимают сопротивления бетона и арматуры

$$M_u = R_b b x (h_0 \div 0,5x), \quad (9)$$

где $x = R_s A_s / R_b b \leq x_R$.

Нагрузочный эффект балки при равномерно распределенной нагрузке q представляется в виде изгибающего момента

$$M = ql_0^2/8. \quad (10)$$

Условие надежности (1) для данного случая записывается в виде $M_u - M \geq 0$.

Ограничимся примером вероятностного расчета несущей способности балки по формуле (9). Каждый аргумент этой формулы можно рассматривать как случайную величину X . Статистические параметры переменных с соответствующим обоснованием приведены в таблице 3. Стандартные отклонения определены по предельным отклонениям ΔX от номинального или нормативного значения X в соответствии с правилом трех сигм $s_x \approx \Delta X/3$.

Таблица 2
Статистические параметры функций случайных величин

Table 2
Statistical parameters of random variable functions

$aX + b$	$am_X + b$	$ a s_X$	α_X
X^2	$m_X^2 + s_X^2$	$2s_X \sqrt{m_X^2 + m_X s_X \alpha_X}$	$\frac{8m_X^3 s_X^3 (\alpha_X + 3v_X)}{s_Z^3}$
$1/X$	$\frac{(1 - v_X^2 - v_X^3 \alpha_X)}{m_X}$	$\frac{\sqrt{v_X^2 - 2v_X^3 \alpha_X}}{m_X}$	$\frac{(6v_X^4 - v_X^3 \alpha_X)}{m_X^3 s_Z^3}$
$aX + bY + c$	$am_X + bm_Y + c$	$\sqrt{a^2 s_X^2 + b^2 s_Y^2}$	$\frac{(a^3 s_X^3 \alpha_X + b^3 s_Y^3 \alpha_Y)}{s_Z^3}$
$X + Y$	$m_X + m_Y$	$\sqrt{s_X^2 + s_Y^2}$	$\frac{(s_X^3 \alpha_X + s_Y^3 \alpha_Y)}{s_Z^3}$
$X - Y$	$m_X - m_Y$	$\sqrt{s_X^2 + s_Y^2}$	$\frac{(s_X^3 \alpha_X - s_Y^3 \alpha_Y)}{s_Z^3}$
XY	$m_X m_Y$	$m_X m_Y \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 + v_X^2 v_Y^2}$	$\frac{m_X^3 m_Y^3 (v_X^3 \alpha_X + v_Y^3 \alpha_Y + 6v_X^2 v_Y^2)}{s_Z^3}$
X/Y	$\frac{m_X(1 + v_X^2 - v_Y^3 \alpha_X)}{m_Y}$	$\frac{m_X \sqrt{v_X^2 + v_Y^2 - 2v_Y^3 \alpha_Y}}{m_Y}$	$\frac{m_X^3 (v_X^3 \alpha_X - v_Y^3 \alpha_Y + 6v_X^4 + 6v_X^2 v_Y^2)}{m_Y^3 s_Z^3}$

Возможны и иные способы определения коэффициентов вариации [21]. Коэффициенты асимметрии приняты по формуле (8). Следует отметить, что большие значения коэффициентов асимметрии случайных величин сопротивлений бетона и арматуры являются признаком того, что аппроксимация их распределения нормальным законом имеет существенную погрешность. Площадь сечения арматуры показана для одного стержня Ø20 мм (всего принято 2Ø20).

При расчете по предельному состоянию все параметры рассматриваются как детерминированные величины.

В результате расчета получено: $h_0 = h - a = 470$ мм; $x = 435 \cdot 628 / 8,5 \cdot 200 = 160,7$ мм; $z = h_0 - 0,5x = 470 - 0,5 \cdot 160,7 = 389,6$ мм; $N_s = R_s A_s = 435 \cdot 628 = 273,20 \cdot 10^3$ Н; $N_b = R_b b x = 8,5 \cdot 160,7 \cdot 200 = 273,20 \cdot 10^3$ Н; $M_u = N z = 273,20 \cdot 10^3 \cdot 389,6 = 106,44 \cdot 10^6$ Н·мм (106,44 кН·м). Допускаемая расчетная нагрузка определена по формуле (10) $q = 8 \cdot 106,44 / 6^2 = 23,65$ кН/м. Относительное граничное значение высоты сжатой зоны определено по формуле $\xi_R = \frac{0,8}{1 + \varepsilon_{s,el} / \varepsilon_{b2}} = 0,491$ (здесь $\varepsilon_{s,el} = R_s / E_s = 435 / 200000 = 0,0022$ и $\varepsilon_{b2} = 0,0035$) $x_R = \xi_R h_0 = 0,491 \cdot 470 = 230,9$ мм > 160,7 мм.

Таблица 3
Статистические параметры переменных формулы (9)

Table 3
Statistical parameters of formula variables (9)

X	m_x	v_x	s_x	α_x	Обоснование
A_{s1}	314 мм ²	0,025	7,85 мм ²	0,075	ГОСТ 34028–2016, [1]
R_s	565,6 Н/мм ²	0,08	45,26 Н/мм ²	0,241	ГОСТ 52544–2006 (A 500, $R_{sn} = 500$ МПа, $R_s = 435$ МПа)
b	200 мм	0,02	4 мм	0,06	ГОСТ 21778–82 (8-й класс точности)
h	500 мм	0,01	5 мм	0,03	ГОСТ 21778–82 (8-й класс точности)
a	30 мм	0,05	1,5 мм	0,15	ГОСТ 13015–2012
R_b	14,13 Н/мм ²	0,135	1,91 Н/мм ²	0,407	СП 63.13330-2012 (B 15, $R_{bn} = 11$ МПа, $R_b = 8,5$ МПа)

Таблица 4
Статистические параметры переменных при детерминированных значениях размеров (9)

Table 4
Statistical parameters of variables with deterministic size values (9)

Функция Z(X, Y)	m_z	s_z	v_z	α_z
$A_s = 2A_{s1}$	628	0	0	0
$N_s = R_s A_s$	$355,20 \cdot 10^3$	$28,42 \cdot 10^3$	0,08	0,241
$N_{b1} = R_b b$	$2,83 \cdot 10^3$	$0,38 \cdot 10^3$	0,135	0,407
$x = N_s / N_{b1}$	126	18,9	0,150	0,534
$h_0 = h - a$	470	0	0	0
$0,5x$	63	9,5	0,150	0,453
$z = h_0 - 0,5x$	407	4,7	0,012	0,057
$N_b = N_{b1} x$	$356,08 \cdot 10^3$	$72,22 \cdot 10^3$	0,203	0,631
$\rho = 0,25$		$62,70 \cdot 10^3$	0,176	0,964
$\rho = 0,387^*$		$56,82 \cdot 10^3$	0,160	1,296
$\rho = 0,5$		$51,46 \cdot 10^3$	0,145	1,744
$M_b = N_b z$	$144,92 \cdot 10^6$	$29,47 \cdot 10^6$	0,203	0,632
$\rho = 0,25$		$25,13 \cdot 10^6$	0,173	1,013
$\rho = 0,387^*$		$22,57 \cdot 10^6$	0,156	1,411
$\rho = 0,5$		$20,20 \cdot 10^6$	0,139	1,970
$M_s = N_s z$	$144,21 \cdot 10^6$	$11,67 \cdot 10^6$	0,081	0,244

* Оценка корреляции выполнена из статического условия равновесия $N_s = N_b$ случайных величин $2\rho = (1 - \beta v_b) / (1 - \beta v_s) = (1 - 3,09 \cdot 0,135) / (1 - 3,09 \cdot 0,08) = 0,774$.

Подобную задачу неоднократно решали вероятностными методами и почти всегда пренебрегали изменчивостью геометрических параметров (геометрических несовершенств) из предположения, что отклонения размеров поперечного сечения учтены коэффициентами безопасности для материалов [7, 22, 23, 24]. Такое упрощение, в частности, закреплено Еврономами [25]. Однако в стандарте РФ 2394 об этом говорится достаточно осторожно: если отклонения геометрических размеров могут иметь существенное влияние на работу и несущую способность сооружения, геометрические размеры следует рассматривать как случайные переменные. Очевидно, что приближенные способы вероятностного расчета могут быть полезны для проверки влияния случайных отклонений переменных.

Результаты вероятностного расчета статистических параметров переменных формулы (9) приведены в таблице 4.

При аппроксимации распределения случайной величины M_b нормальным законом вероятностной оценкой надежности может быть величина $\beta = (m_z - M_b)/s_z = (144,92 - 106,44)/20,2 = 1,9$ (максимальная обеспеченность расчетного значения прочности балки 0,97). Для случайной величины M_s $\beta = (144,21 - 106,44)/11,67 = 3,24$ (обеспеченность 0,9996). Большая разница вероятностных оценок случайных величин M_b и M_s функции (9) отмечалась и ранее, когда изменчивость базовых переменных аппроксимировали нормальным законом.

Возникает вопрос, по какому параметру оценивать вероятность отказа конструкции при равенстве детерминированных значений $M_b = M_s$. Например, в работе [14] сделан вывод,

что обеспеченность прочности балки следует принимать по минимальному значению β , и тогда расчетное (с обеспеченностью 0,997) значение прочности следует принимать равным $M_u = 144,92 - 3 \cdot 20,2 = 84,32 \text{ кН} \cdot \text{м} < 106,44 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Следует отметить, что вероятностные нормы JCSS (Объединенный комитет по надежности конструкций) рекомендуют при вероятностных расчетах из равноценных выбирать распределение, результатом которого является меньшая степень надежности [16].

При аппроксимации изменчивости случайных величин M_b и M_s логарифмически нормальным законом расчетное значение несущей способности балки: если $\alpha_b = \alpha_s = 0$, то $M_b = 144,92 - 3,09 \cdot 20,2 = 82,5 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$ и $M_s = 144,21 - 3,09 \cdot 11,67 = 108,15 \text{ кН} \cdot \text{м} > M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$. Но при логнормальном распределении вместо коэффициента β следует принимать коэффициент вероятности u в зависимости от коэффициента асимметрии (таблица 5).

Если $\alpha_b = 0,632$ (при коэффициенте корреляции $\rho = 0$ переменных N_{b1} и x) $u = 2,336$ и $M_b = 144,92 - 2,335 \cdot 29,47 = 76,08 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$; если $\alpha_b = 1,013$ (при $\rho = 0,25$) $M_b = 144,92 - 1,983 \cdot 25,13 = 95,09 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$; если $\alpha_b = 1,411$ (при $\rho = 0,387$) $M_b = 144,92 - 1,756 \cdot 22,57 = 105,29 \text{ кН} \cdot \text{м} \approx M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$ (погрешность около 1 %); если $\alpha_b = 1,97$ (при $\rho = 0,5$) $M_b = 144,92 - 1,437 \cdot 20,2 = 115,89 \text{ кН} \cdot \text{м} > M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$, при этом $\alpha_s = 0,24$ и $M_s = 144,21 - 2,83 \cdot 11,67 = 111,18 \text{ кН} \cdot \text{м} > M_u \text{ кН} \cdot \text{м}$. Учтена отрицательная корреляция переменных N_{b1} и x при определении стандартного отклонения переменной N_b в соответствии с формулой (2), так как при большей прочности сжатого бетона требуется меньшая его площадь.

Таблица 5
Значения коэффициента вероятности при логнормальном распределении

Table 5
Values of the probability coefficient when a lognormal distribution

α_x	u при $P = 0,05$	u при $P = 0,001$
- 2,0	- 1,89	- 6,24
- 1,0	- 1,85	- 4,70
- 0,5	- 1,77	- 3,86
0,0	- 1,64	- 3,09
0,5	- 1,49	- 2,46
1,0	- 1,34	- 1,99
2,0	- 1,10	- 1,42

Для проверки условия $\psi = \xi_R - \xi \geq 0$, преобразованного в $\psi = \xi_R - \xi \geq 0$, вычислены статистические параметры переменной ξ_R с учетом изменчивости R_s : $m_{\xi_R} = 0,440$; $s_{\xi_R} = 0,043$ и $\alpha_{\xi_R} = 0,253$. Параметры ξ : $m_{\xi} = 126/470 = 0,268$; $s_{\xi} = 18,9/470 = 0,043$ и $\alpha_{\xi} = 0,534$. Для приближенной оценки статистических параметров функции ψ можно воспользоваться формулой для функции $X - Y$ (см. таблицу 2). Получено $m_{\psi} = 0,44 - 0,268 = 0,172$; $s_{\psi} = (0,04^2 + 0,043^2)^{1/2} = 0,059$ и положительное значение коэффициента асимметрии $\alpha_{\psi} = 0,066$. Так как $\alpha_{\psi} < 0,1$, то распределение переменной ψ можно принять по нормальному закону. Поэтому вероятность условия определена по формуле (2) по индексу надежности $\beta_{\psi} = 0,172/0,059 = 2,915$ (вероятность 0,9982).

Из таблицы 5 видно, что нормируемые значения переменных при нормальном распределении ($\alpha = 0$) могут значительно отличаться

от соответствующих величин асимметричного логнормального распределения. Тем самым при аппроксимации случайных величин переменных логнормальным распределением устраняется противоречие вероятностных методов и метода предельного состояния применительно к задаче оценки надежности изгибаемых железобетонных элементов.

В таблице 6 приведены результаты расчета функции (9) с учетом изменчивости всех переменных.

При аппроксимации распределения случайной величины M_b нормальным законом индекс надежности $\beta = (144,92 - 106,44)/20,64 = 1,86$, случайной величины M_s $\beta = (144,21 - 106,44)/12,68 = 2,98$. Разница вероятностных оценок случайных величин M_b и M_s остается большой.

Таблица 6
Статистические параметры переменных функций формулы (9)

Table 6
Statistical parameters of formula variable functions (9)

Функция Z(X, Y)	m_z	s_z	v_z	α_z
$A_s = 2A_{s1}$	628	15,7	0,025	0,075
$N_s = R_s A_s$	$355,2 \cdot 10^3$	$29,8 \cdot 10^3$	0,084	0,251
$N_{b1} = R_b b$	$2,83 \cdot 10^3$	0,386	0,136	0,411
$x = N_s / N_{b1}$	127,9	18,0	0,141	0,664
$h_0 = h - a$	470	5,22	0,011	0,023
$0,5x$	64	9	0,141	0,425
$z = h_0 - 0,5x$	406	10,4	0,026	- 0,273
$N_b = N_{b1} x$ $\rho = 0,25$ $\rho = 0,387$ $\rho = 0,5$	$356,08 \cdot 10^3$	$70,09 \cdot 10^3$ $60,8 \cdot 10^3$ $55,05 \cdot 10^3$ $49,81 \cdot 10^3$	0,197 0,171 0,155 0,140	0,669 1,025 1,380 1,863
$M_b = N_b z$ $\rho = 0,25$ $\rho = 0,387$ $\rho = 0,5$	$144,92 \cdot 10^6$	$28,81 \cdot 10^6$ $25,07 \cdot 10^6$ $22,78 \cdot 10^6$ $20,64 \cdot 10^6$	0,199 0,173 0,157 0,142	0,670 1,012 1,347 1,795
$M_s = N_s z$	$144,21 \cdot 10^6$	$12,68 \cdot 10^6$	0,088	0,254

При аппроксимации распределения случайных величин M_b и M_s логарифмически нормальным законом и $\alpha_b = \alpha_s = 0$ расчетные значения несущей способности балки $M_b = 144,92 - 3,09 \cdot 20,64 = 81,14 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$ (с учетом корреляции) и $M_s = 144,21 - 3,09 \cdot 12,68 = 105,03 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$. При $\alpha_M = 0,67$: $M_b = 144,92 - 2,3 \cdot 28,81 = 78,65 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$; при $\alpha_M = 1,012$: $M_b = 144,92 - 1,99 \cdot 25,97 = 93,24 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$; если $\alpha_b = 1,347$ (при $\rho = 0,387$) $M_b = 144,92 - 1,79 \cdot 22,78 = 104,14 \text{ кН}\cdot\text{м} \approx M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$; при $\alpha_M = 1,795$: $M_b = 144,92 - 1,53 \cdot 20,64 = 113,34 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$, при этом $M_s = 144,21 - 2,82 \cdot 12,68 = 108,44 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_u \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Влияние изменчивости геометрических размеров в приведенном примере оказалось несущественным, около 3%.

Для дальнейшего расчета примем $m_R = 144,21 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $s_R = 11,67 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и $\alpha_R = 0,244$.

Допускаемая расчетная нагрузка определена по формуле (10) $q = 8 \cdot 106,44/6^2 = 23,65 \text{ кН}/\text{м}$. Пусть балка загружена постоянной и временной нагрузкой $q = g + s$ с коэффициентом вариации $v_g = 0,05$.

Примем статистические характеристики постоянной нагрузки $m_g = 12 \text{ кН}/\text{м}$, $s_g = 0,6 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и временной нагрузки $m_s = 8 \text{ кН}/\text{м}$, $s_s = 0,4 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Коэффициент асимметрии: для постоянной нагрузки, распределенной по логнормальному закону, по формуле (8) $\alpha_g = 0,15$; для временной нагрузки, распределенной по закону Гумбеля, $\alpha_s = 1,14$ [2].

Обобщенные статистические характеристики определяем по функции $X + Y$ (см. таблицу 2). Получено $m_q = m_g + m_s = 54 + 36 = 90 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $s_q = \sqrt{s_g^2 + s_s^2} = \sqrt{0,6^2 + 0,4^2} = 0,72 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и $\alpha_q = (s_g^3 \alpha_g + s_s^3 \alpha_s) / s_q^3 = (0,6^3 \cdot 0,15 + 0,4^3 \cdot 1,14) / 0,72^3 = 0,282$. По формуле (10) уточняем и принимаем для дальнейшего расчета статистические характеристики нагрузочного эффекта $m_F = 90 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $s_F = 3,24 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и $\alpha_F = 0,282$.

Индекс надежности балки определяем при $\alpha = 0$ по формуле (2) $\beta = (144,21 - 90) / (11,67^2 + 3,24^2)^{1/2} = 34,21 / 12,11 = 2,82 < 3,09$ (надежность 0,9975 меньше требуемой 0,999).

Для приближенной оценки асимметрии распределения функции S можно воспользоваться формулой для функции $X - Y$ (см. таблицу 2). Получено положительное значение коэффициента асимметрии $\alpha_S = (11,67^3 \cdot 0,244 \div 3,24^3 \cdot 0,282) / 12,11^3 = 0,213$.

Возможны приемы, позволяющие выполнить приближенно вероятностный расчет функции S с применением трехпараметрического распределения [5]. В зависимости от коэффициента асимметрии можно приближенно вычислить коэффициент c_S

$$c_S = \left[\left[(\sqrt{\alpha_S^2 + 4} + \alpha_S)^{1/3} \div (\sqrt{\alpha_S^2 + 4} - \alpha_S)^{1/3} \right] \right] / \sqrt[3]{2}. \quad (11)$$

Получено положительное значение коэффициента $c_S = 0,071$.

Если в функции трехпараметрического логнормального распределения применяется параметр c_S , то преобразование статистических параметров производится по формулам

$$\sigma_S = \sqrt{\ln(1 + c_S^2)} \text{ и } \mu_S = \ln(s_S/c) \div \ln |m_S \div s_S/c| \div \sigma_S^2/2 - \quad (12)$$

Получим по формулам (12) параметры преобразованной переменной $\sigma_S = [\ln(1 + c_S^2)]^{1/2} = 0,071$ и $\mu_S = \ln(s_S/c_S) - \ln |m_S - s_S/c_S| - \sigma_S^2/2 = 0,379$. Индекс надежности $\beta = \mu_S/\sigma_S = 5,34 > 3,09$.

Таким образом, учет асимметрии позволяет подтвердить высокую надежность балки, рассчитанной по методу предельного состояния.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует тенденция к постепенному переходу к вероятностным методам расчета, поскольку путь обеспечения надежности зависит от огромного числа факторов, связанных с эксплуатацией конструкции и влияние которых проблематично оценить частными коэффициентами метода предельных состояний. К тому же полувероятностный метод предельных состояний, который регламентирует ГОСТ 27751, обеспечивая надежность конструкций, не даёт ответа на вопрос, насколько конструкция надёжна в тех или иных условиях.

При вероятностных расчетах рассматриваются случайные величины и функции, распределенные по разным законам, зачастую неизвестным. Эта неопределенность ориентирует проектировщика на теоретические методы оценки надежности и умение оперативного её определения. Упрощенные процедуры расчета позволяют выполнить оперативную оценку конструктивной надежности с использованием вероятностных концепций.

Для оперативной оценки надежности конструкций существуют приближенные методы. Метод двух моментов применим для оценки

надежности в относительно простых расчетных ситуациях и при сравнении вариантов. Метод проектных точек является модификацией метода моментов для расчета конструкций на заданную надежность. Но оба метода основаны на распределении переменных по нормальному закону, в то время как временные нагрузки распределены по асимметричным законам.

Предлагается приближенный способ вероятностного расчета и оценки надежности достаточно сложных композиций случайных величин с последовательной реализацией статистических параметров двухэлементных функций, аппроксимированных логнормальным трехпараметрическим распределением. При положительной асимметрии переменных результаты расчета с применением симметричного нормального распределения могут быть значительно заниженными.

На примере сравнили расчетное значение $M_u = M_b = M_s = 106,44$ кН·м несущей способности железобетонной балки по нормальным сечениям, запроектированной по предельным состояниям, и расчетные значения по бетону и арматуре M_b и M_s , полученные вероятностным методом с обеспеченностью 0,999. При аппроксимации изменчивости случайных величин M_b и M_s логарифмически нормальным законом получены расчетные значения M_b и M_s : если $\alpha_b = \alpha_s = 0$ (асимметрия не учитывается), то $M_b < M_u$ и $M_s > M_u$ (расхождение между M_b и M_s около 30%); если $\alpha \neq 0$, $M_b \approx M_s > M_u$. Тем самым показано, что вероятностным расчетом с учетом коэффициента асимметрии обоснована обеспеченность расчетного значения несущей способности железобетонной балки по нормальным сечениям, запроектированной по предельным состояниям.

Пренебрежение асимметрией может существенно исказить оценку надежности конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер А.В. Развитие требований к безотказности сооружений // Вестник ТГСАУ. 2015. № 1. С. 81-101.
2. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. Санкт-Петербург, Наука, 2001. 295 с.
3. Осипов С.Н. Об оценке надежности результатов испытаний физических свойств строительных материалов // Наука и техника. 2014. № 5. С. 1-7.
4. Краснощеков Ю.В. Учет изменчивости постоянных нагрузок при расчете конструкций зданий и сооружений // Вестник СибАДИ. 2018. № 1. С. 88-97.
5. Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю. Основы проектирования конструкций зданий и сооружений. Москва, Инфра-Инженерия, 2019. 316 с.
6. Колдин А.О., Петров И.С., Сорокин Е.В. Оценка влияния расчетно-конструктивных параметров на надежность железобетонных плит безопалубочного формования // Актуальные вопросы строительства. Саранск, МордГУ, 2007. С. 109-117.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. Москва, АСВ, 2008. 184 с.
8. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Москва, АСВ, 2010. 384 с.
9. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Москва, Стройиздат, 1994. 288 с.
10. Складнев Н.Н., Дрейер Ф.Э. О вероятностном расчете и проектировании железобетонных изгибаемых элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 3. С. 1-4.
11. Андреев О.О. Оценка несущей способности железобетонных сечений с учетом вероятностной природы прочности бетона и стали. Строительная механика и расчет сооружений. 1984. № 6. С. 16–19.
12. Гвоздев А.А., Краковский М.Б., Бруссер М.И. [и др.] Связь статистического контроля прочности бетона с надежностью железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1985. № 3. С. 37-38.
13. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. Вильнюс. 1985. 156 с.
14. Неверова Е.Г., Гасратова Н.А. Расчет надежности железобетонных элементов конструкций // Молодой ученый. 2016. №9. Ч. 1. С. 1-10.
15. Гуца Ю.П., Бруссер М.И., Краковский М.Б., Фигаровский В.В. Стандарт на правила контроля прочности бетона // Бетон и железобетон. 1988. № 1. С. 39-40.
16. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, Высшая школа, 1999. 576 с.
18. Gulvanessian H., Calgaro J.-A., Holicky M. Designer's Guide to EN 1990, Eurocode: Basis of Structural Design. Thomas Telford. London, 2002. 192 p.
19. Holicky M. Implementation of Eurocodes Handbook 2 [Руководство по использованию Еврокодов. Базовые принципы конструктивной надежности]. 2016. Pp. 73-104.
20. Hastings N.A.J., Peacock J.B. Statistical distributions. London Butterworths. 1975. 96 p.
21. Краснощеков Ю.В. О безопасности железобетонных мостов с плитными пролетными строениями // Вестник СибАДИ. 2018. № 6. С. 923-932.
22. Holicky M., Vrouwenvelder T. Reliability analysis of a reinforced concrete column designed according to the Eurocodes, JABSE Colloquium. Delft, 1996. Pp. 251-265.
23. Краснощеков Ю.В. Оценка надежности железобетонных элементов покрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 9. С. 23-25.
24. Ивашенко Ю.А., Фердер А.В. Система уравнений для определения функций распределения

при вероятностных методах расчета // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т. 17, № 1. С. 34-37.

25. Биби Э.В., Нараянан Р.С. Проектирование железобетонных конструкций. Москва, МГСУ, 2013. 292 с.

REFERENCES

1. Perel'muter A.V. Razvitiye trebovaniy k bezopasnosti sooruzheniy [Development of requirements for reliability of structures]. *Vestnik TGSAU*. 2015; 1: 81-101. (In Russian)

2. Vadzinskiy R.N. Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam [Handbook of probability distributions]. Sankt-Peterburg, Nauka, 2001. 295 с. (In Russian)

3. Osipov S.N. Ob otsenke nadezhnosti rezultatov ispytaniy fizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov [On evaluating the reliability of test results of physical properties of building materials]. *Nauka I tekhnika* [Science and technology]. 2014; 5: 1-7. (In Russian)

4. Krasnoshchekov Yu. V. Uchet izmenchivosti postoyannykh nagruzok pri raschete konstruktsiy zdaniy I sooruzheniy [Taking into account the variability of constant loads when calculating structures of buildings and structures]. *Vestnik SibADI*. 2018; 15(1): 88-97. (In Russian)

5. Krasnoshchekov Yu. V., Zapoleva M. Yu. Osnovy proektirovaniya konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy [Fundamentals of design of structures of buildings and structures]. Moskovo-Vologda, Infra-inzheneriya Publ., 2019. 316 p. (In Russian)

6. Koldin A.O., Petrov I.S., Sorokin E.V. Otsenka vliyaniya raschetno-konstruktivnykh parametrov na nadezhnost' zhelezobetonnykh plit bezopalubochnogo formovaniya [Evaluation of the influence of design parameters on the reliability of reinforced concrete slabs without formwork]. *Aktualnye voprosy stroitelstva*. Saransk. *Vestnik MordGU*. 2007. 109-117.

7. Lychev A.S. Nadyozhnost' stroitelnykh konstruktsiy [Reliability of building structures]. Moskovo. ASV, 2008. 184 p. (In Russian)

8. Raizer V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzheniy [Theory of reliability of structures]. Moskovo, ASV, 2010. 384 p. (In Russian)

9. Shpete G. Nadezhnost nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy [Reliability of load-bearing building structures]. Trans. from German. Moskovo, Stroyizdat, 1994. 288 p. (In Russian)

10. Skladnev N.N., Dreyer F.E. O veroyatnostnom raschete I proektirovanii zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov [On probabilistic calculation and design of reinforced concrete bending elements]. *Stroitel'naya mekhanika I raschet zooruzheniy* [Construction mechanics and calculation of structures]. 1983; 3: 1-4. (In Russian)

11. Andreev O.O. Otsenka nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh secheniy s uchetom veroyatnostnoy prirody prochnosti betona I stali [Evaluation of the load-bearing capacity of reinforced concrete sections with

consideration of the probabilistic nature of the strength of concrete and steel]. *Stroitel'naya mekhanika I raschet zooruzheniy*. 1984; 6: 16-19. (In Russian)

12. Gvozdev A.A., Krakovskiy M.B., Brusser M.I. i dr. Svyaz' staticheskogo kontrolya prochnosti betona s nadezhnost'yu zhelezobetonnykh konstruktsiy [Relationship of statistical control of concrete strength to the reliability of reinforced concrete structures]. *Beton I zhelezobeton*. 1985; 3: 37-38. (In Russian)

13. Kudzis A.P. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [Evaluating the reliability of reinforced concrete structures]. *Vilnyus*. 1985. 156 p. (In Russian)

14. Neverova E.G., Gasratova N.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnykh elementov konstruktsiy [Calculation of reliability of reinforced concrete structural elements]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016; 9: 1-10. (In Russian)

15. Gushcha Yu.P., Brusser M.I., Krakovskiy M.B., Figarovskiy V.V. Standart na pravila kontrolya prochnosti betona [Standard for concrete strength control rules]. *Beton I zhelezobeton*. 1988; 1: 39-40. (In Russian)

16. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: *Joint Committee on Structural Safety*. 2001.

17. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moskovo, Vysshaya shkola, 1999. 576 p. (In Russian)

18. Gulvanessian H., Calgaro J.-A., Holicky M. Designer's Guide to EN 1990, Eurocode: Basis of Structural Design. Thomas Telford. London, 2002. 192 p.

19. Holicky M. Implementation of Eurocodes Handbook 2. 2016. Pp. 73-104.

20. Hastings N.A.J., Peacock J.B. Statistical distributions. London Butterworths. 1975. 96 p.

21. Krasnoshchekov Yu. V. O bezopasnosti zhelezobetonnykh mostov s plitnymi proletnymi stroeniyami [On the safety of reinforced concrete slab bridges with spans structures]. *Vestnik SibADI*. 2018; 15(6): 923-932. (In Russian)

22. Holicky M., Vrouwenvelder T. Realiability analysis of a reinforced concrete column designed according to the Eurucodes, JABSE Colloquium. Delft, 1996. 251-265.

23. Krasnoshchekov Yu. V. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh elementov pokrytiy [Assessment of the reliability of reinforced concrete elements of coatings]. *Promyshlennoe I grazhdanskoe stroitelstvo*. 2005; 9: 23-25. (In Russian)

24. Ivashenko Yu.A., Ferder A.V. Sistema uravneniy dlya opredeleniya funktsiy raspredeleniya pri veroyatnostnykh metodakh rascheta [System of equations for determining distribution functions in probabilistic methods of calculation]. *Vestnik YuurGU*. 2017; 1: 34-37. (In Russian)

25. Beeby A.W., Narayanan R.S. Design of concrete structures. Moskovo, MDSU, 2013. 292 p. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Краснощечков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, ORCID 0000-0002-6695-1648, проф. кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Сибирский автомобильно-дорожный университет» (СибАДИ) (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5. E-mail: uv1942@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, ORCID 0000-0002-6695-1648, Professor of the Building Structures Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira Ave, 5. E-mail: uv1942@mail.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 представлено 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 А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисуночные 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. Корректурa статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.