

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 18, № 5. 2021
Сквозной номер выпуска – 81
Vol. 18, no. 5. 2021
Continuous issue – 81

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 18, № 5. 2021. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 81
(VOL. 18, NO. 5. 2021. CONTINUOUS ISSUE – 81)**

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Rospechat Agency's catalog

www.vestnik.sibadi.org
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2021

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 идентификаторы цифровых объектов (DOI). Редакция осуществляет рецензирование (двухстороннее «слепое») всех поступающих в редакцию материалов с целью взыскательной экспертной оценки, а также проверку статей на плагиат.

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 27.10.2021. Дата выхода в свет 29.10.2021. 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)», 2021

“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 27.10.2021. Publication date is 29.10.2021. 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)", 2021

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,
ORCID ID 0000-0003-0525-5320

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-ЮГРПЫ», 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. Днепрпетровск, 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

Усачева Лилия Рафаиловна редактор-ответственный секретарь
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

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,
ORCID ID 0000-0003-0525-5320

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

Lilya R. Usacheva
Executive Journal Secretary
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

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

В.А. Николаев

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ, КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ДИСКОВОГО РЫХЛИТЕЛЯ 476**

И.С. Кузнецов

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА
ДЛЯ ПОДКОПА ТРУБОПРОВОДА..... 488**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

Б.С. Трофимов, Л.С. Трофимова

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ
С УЧЕТОМ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ЕГО КОНСТРУКЦИЮ 498**

Д.С. Алешков, М.В. Банкет, М.В. Суковин

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОТОПЛЕНИЯ
В ПАССАЖИРСКОМ САЛОНЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР 510**

Г.Н. Вотинков, Д.В. Мальцев, Д.С. Репецкий

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК
БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С СИСТЕМАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
ВПРЫСКА ТОПЛИВА..... 524**

С.Н. Кривцов, Т. И. Кривцова

**ИЗМЕНЕНИЕ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА
ПРИ ДОБАВЛЕНИИ В НЕГО РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА 534**

В.В. Донченко, А.Н. Шумский

**ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ,
ПРИМЕНИТЕЛЬНЫХ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРУЕМОГО
ПЕРЕКРЕСТКА..... 544**

А. А. Гуськов, Н. А. Степанов, С. А. Анохин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА В ГОРОДЕ ТАМБОВЕ 554

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

И.Л. Чулкова, О.Е. Смирнова, А.В. Красова

ПРИМЕНЕНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА..... 566

А.С. Александров

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО
СОПРИТИВЛЕНИЮ СДВИГУ В ГРУНТЕ 576**

А.С. Пролыгин, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин, Н.П. Александрова

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ГРУНТОЩЕБЕНОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ СЖАТИИ 614**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Vladimir A. Nikolayev
**GEOMETRIC, KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS
 OF THE DISC RIPPER 477**

Iliia S. Kuznetsov
**COMPARATIVE ANALYSIS OF ECONOMIC EFFICIENCY APPLICATION
 OF MILLING EXCAVATOR WORKING EQUIPMENT
 FOR PIPELINE UNDERMINING 489**

PART II. TRANSPORT

Boris S. Trofimov, Iudmila S. Trofimova
**LORRY WORK PLANNING WITH CONSIDERATION
 OF ITS DESIGN MODIFICATION 499**

Denis A. Aleshkov, Mikhail V. Banket, Mikhail V. Sukovin
**DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE HEATING PROCESS
 IN THE PASSENGER CABIN OF A VEHICLE UNDER LOW TEMPERATURE
 CONDITIONS 511**

Georgij N. Votinov, Dmitry V. Maltsev, Dmitry S. Repetsky
**MONITORING OF THE STATE OF ELECTROMAGNETIC FUEL INJECTORS
 OF GASOLINE ENGINES WITH DISTRIBUTED FUEL INJECTION SYSTEMS 525**

Sergey N. Krivtsov, Tatyana I. Krivtsova
**CHANGING THE LUBRICITY OF DIESEL FUEL WITH VEGETABLE OIL
 ADDITIVE 535**

Vadim V. Donchenko, Alexander N. Shumskiy
**ESTIMATION OF TRUCK REDUCTION FACTORS APPLICABLE
 TO CALCULATION OF PARAMETERS OF A REGULATED INTERSECTION 545**

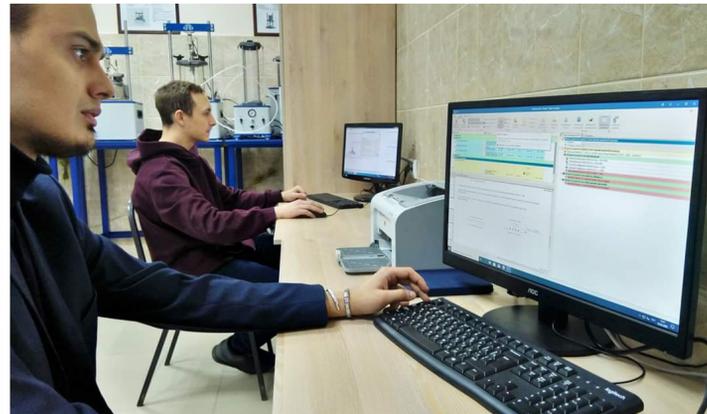
Artem A. Guskov, Nikita A. Stepanov, Sergey A. Anokhin
TRAFFIC NOISE RESEARCH IN TAMBOV CITY 555

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Irina L. Chulkova, Olga E. Smirnova, Anna V. Krasova
USE OF SEWAGE SLUDGE IN CONCRETE INDUSTRY 567

A.S. Aleksandrov
**ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATING ROAD STRUCTURES
 BASED BY SHEAR RESISTANCE IN THE SOIL 577**

Aleksandr S. Prolygin, Gennadii V. Dolgikh, Aleksandr L. Kalinin, Natalia P. Alexandrova
**INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE DEFORMATION PROPERTIES
 OF SOIL-CRUSHED STONE SAMPLES DURING COMPRESSION 615**



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



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

Научная статья

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-476-487>

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ, КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДИСКОВОГО РЫХЛИТЕЛЯ

В.А. Николаев

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия

Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

АННОТАЦИЯ

Введение. Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. Для рыхления грунта в агрегате используются долотообразные рабочие органы. Часто для резания грунта применяют дисковые рабочие органы, поэтому вызывает практический интерес целесообразность применения пассивных дисков в дорожно-строительных технических средствах, в частности, в агрегате непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автомобильных дорог. Несмотря на большое количество работ, подробный анализ работы пассивных дисков не был произведён. Поэтому для сопоставления затрат энергии на резание грунта пассивными дисками и долотообразными рабочими органами необходимо произвести теоретический анализ работы пассивных дисков. Анализ затрат энергии дискового рыхлителя невозможно осуществить, не имея ориентировочных значений его геометрических, кинематических и динамических параметров.

Методика исследования. В составе агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог каждый диск был бы зажат грунтом с обеих сторон и осуществлял зажатое резание, поэтому для анализа принят дисковый рыхлитель, агрегатированный с отдельным энергетическим устройством. На основе конструктивной компоновки выявлены рациональные геометрические параметры дискового рыхлителя. Разработана методика расчёта его кинематических и динамических параметров. В частности, рассмотрена методика определения средневзвешенной окружной скорости диска, угловой скорости диска и окружной скорости точки на кромке лезвия диска. Рассмотрены режимы резания грунта различными участками диска.

Результаты. На основе разработанной методики выявлена зависимость минимального диаметра диска от глубины разработки грунта. Вычислен момент сопротивления грунта вращению дисков. Определена горизонтальная и вертикальная составляющая сопротивления грунта переднему диску, осуществляющему зажатое резание, и последующим дискам, осуществляющим полузажатое резание грунта. Выявлена необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта дисковым рыхлителем и зависимость силы тяги энергетического устройства для резания грунта от глубины разработки грунта. Вычислена производительность агрегата, включающего энергетическое устройство и дисковый рыхлитель.

Заключение. Так как в составе агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог диски будут осуществлять зажатое резание грунта, то для предварительного рыхления грунта дисками более целесообразно использовать отдельный агрегат, включающий энергетическое устройство и дисковый рыхлитель. На основании проведённых теоретических исследований выявлена необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта и общее тяговое усилие, необходимое для перемещения дискового рыхлителя. Вычислена производительность агрегата. Для сопоставления затрат энергии на резание грунта пассивными дисками и долотообразными рабочими органами необходимо произвести теоретический анализ затрат энергии на работу пассивных дисков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: агрегат непрерывного действия, грунт, диск, дисковый рыхлитель, геометрические параметры, кинематические параметры, динамические параметры

Статья поступила в редакцию 08.09.2021; одобрена после рецензирования 07.10.2021;

принята к публикации 29.10.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Геометрические, кинематические и динамические параметры дискового рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 476-487. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-476-487>

© Николаев В.А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-476-487>

GEOMETRIC, KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE DISC RIPPER

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University, Yaroslavl, Russia
Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

ABSTRACT

Introduction. The unit of continuous action for the formation of the underlying layer is designed to increase labour productivity in the construction of roads and other objects, for the construction of which it is necessary to remove the upper layer of soil. For loosening of soil in the unit used bit-like working bodies. Often, disc working bodies are used to cut the soil. Therefore, the expediency of using passive discs in road-building technical means, in particular, in the unit of continuous action for the formation of the underlying layer of highways, is of practical interest. Despite the large number of works, a detailed analysis of the operation of passive disks was not made. Therefore, in order to compare the energy costs for cutting the soil with passive discs and chisel-shaped working bodies, it is necessary to make a theoretical analysis of the operation of passive disks. Analysis of the energy costs of the disk ripper cannot be carried out without having the approximate values of its geometric, kinematic and dynamic parameters.

The method of research. As part of a continuous unit to form the underlying layer of roads, each disc would be clamped with soil on both sides and carried out clamped cutting. Therefore, a disk ripper is adopted for analysis, aggregated with a separate energy device. On the basis of the constructive layout, rational geometric parameters of the disk ripper are revealed. The method of calculation of its kinematic and dynamic parameters is developed. In particular, the method of determining the weighted average circumferential velocity of the disk, the angular velocity of the disk and the circumferential velocity of the point on the edge of the disk blade is considered. The modes of cutting the soil by various parts of the disk are considered.

Results. On the basis of the developed technique, the dependence of the minimum diameter of the disk on the depth of soil development was revealed. The moment of resistance of the soil to the rotation of the disks is calculated. The horizontal and vertical component of soil resistance to the front disc carrying out clamped cutting and subsequent discs carrying out semi-clamped cutting of the soil are determined. The necessary thrust force of the energy device for cutting the soil with a disk ripper and the dependence of the thrust force of the energy device for cutting the soil on the depth of soil development were revealed. The performance of the unit, including the power device and the disk ripper, is calculated.

Conclusion. Since as part of the unit of continuous action for the formation of the underlying layer of roads, the disks will carry out clamped cutting of the soil, for preliminary loosening of the soil with disks, it is more expedient to use a separate unit, including an energy device and a disk ripper. On the basis of the theoretical studies carried out, the necessary thrust force of the energy device for cutting the soil and the total traction force necessary to move the disk ripper were revealed. The performance of the unit is calculated. To compare the energy costs for cutting the soil with passive discs and chisel-shaped working bodies, it is necessary to make a theoretical analysis of the energy costs for the operation of passive disks.

KEYWORDS. Continuous unit, soil, disk, disc ripper, geometric parameters, kinematic parameters, dynamic parameters

The article was submitted 08.09.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev V.A. Geometric, kinematic and dynamic parameters of the disc ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2021; 18 (5): 476-487. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-476-487>

© Nikolayev V.A., 2021



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) определены рациональные геометрические параметры дискового рыхлителя;

2) выявлен момент сопротивления грунта вращению диска, осуществляющего зажатое и полузажатое резание;

3) определена необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта дисковым рыхлителем и зависимость силы тяги энергетического устройства для резания грунта от глубины разработки грунта;

4) вычислена производительность агрегата, включающего энергетическое устройство и дисковый рыхлитель.

ВВЕДЕНИЕ

В комплексе технических средств непрерывного действия для производства дорожно-строительных работ первым расположен агрегат для формирования подстилающего слоя (патент РФ №2689007). Для рыхления грунта в агрегате (рисунок 1, а) применены до-

лотообразные рабочие органы РО, размещённые в полых валах по спирали (рисунок 1, б). В транспортное средство М грунт загружают посредством ковшей К. Теоретические основы резания грунта рабочими органами этого агрегата весьма подробно рассмотрены в статьях [1, 2, 3] и других публикациях журнала «Вестник СибАДИ».

Часто для резания грунта применяют дисковые рабочие органы. Так, в сельском хозяйстве пассивные диски используют в тяжёлых дисковых боронах, лушительниках, дискаторах, картофелеуборочных комбайнах. Поэтому вызывает практический интерес целесообразность применения пассивных дисков в дорожно-строительных технических средствах, в частности, в агрегате, представленном на рисунке 1, а.

Большой вклад в теоретическое обоснование применения пассивных дисков в строительной технике внёс Е.В. Курилов¹. Теоретические основы резания грунта также отражены

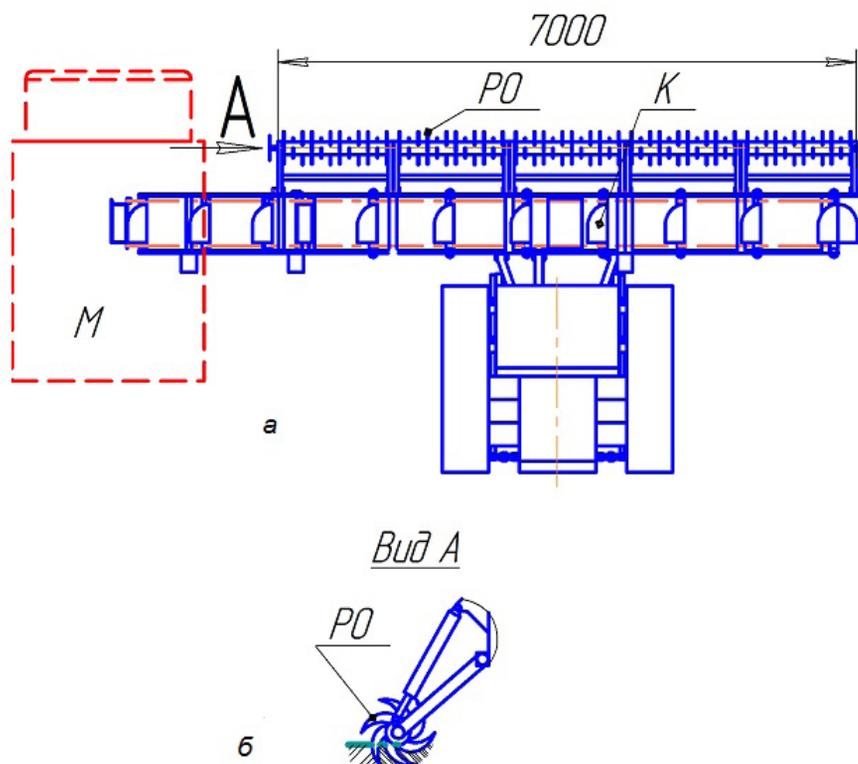


Рисунок 1 – Схема агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги:
а – вид сверху; б – вид А

Figure 1 – Scheme of the unit of continuous action for the formation of the underlying layer of the road:
a) top view; b) type A

¹ Курилов Е.В., Трошин Д.И. Косое резание грунта дисковым ножом: опыт проектирования и эксплуатации экскаваторных ковшей с подвижными боковыми стенками. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2017. 127 с.

в работах^{2,3} [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Однако, несмотря на большое количество работ, подробный анализ работы пассивных дисков не был произведён. Поэтому для сопоставления затрат энергии на резание грунта пассивными дисками и долотообразными рабочими органами необходимо произвести теоретический анализ работы пассивных дисков. Анализ затрат энергии дискового рыхлителя невозможно осуществить, не имея хотя бы ориентировочных значений его геометрических, кинематических и динамических параметров.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе агрегата, представленного на рисунке 1, а, каждый диск был бы зажат грунтом с обеих сторон и осуществлял зажатое резание (рисунок 2, а).

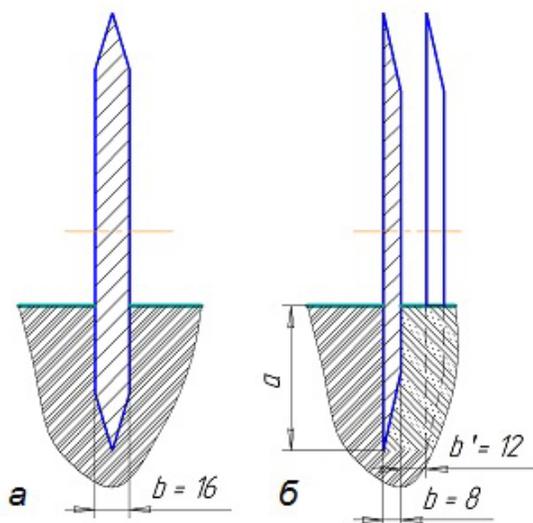


Рисунок 2 – Схема резания грунта диском: а – зажатого; б – полузажатого

Figure 2 – Scheme of cutting the soil with a disk: a) clamped; b) semi-clamped

С одной стороны, сопротивление слоя грунта, с учётом трения о грунт боковых стенок дисковых рабочих органов, будет значительно больше сопротивления грунта резанию долотообразными рабочими органами. С другой стороны, дисковые рабочие органы разрежут грунт на заданную глубину не фрагментарно,

как долотообразные рабочие органы. Тем самым они в какой-то мере увеличат степень крошения грунта. Однако более целесообразно для рыхления грунта использовать отдельный агрегат (рисунок 3).

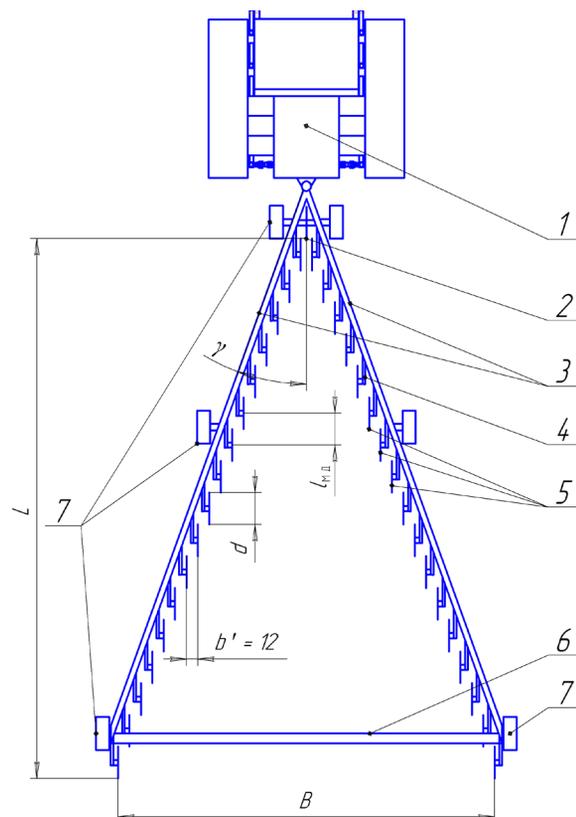


Рисунок 3 – Схема агрегата для рыхления грунта, вид сверху

Figure 3 – Scheme of the unit for loosening the soil, top view

К энергетическому устройству 1 присоединены тяги 3, опирающиеся на опорные колёса 7. К ним присоединён передний диск 2 с двухсторонней заточкой и симметрично поковки 4. На поковках установлены диски 5 с односторонней заточкой. Тяги соединены стяжкой 6. При движении агрегата передний диск осуществляет зажатое резание грунта. Остальные диски осуществляют полузажатое резание (рисунок 2, б), так как режут и смещают последовательно грунт в пространство, созданное ранее прошедшим диском. Диск прижат к грунту с одной (на рисунке с левой) стороны, поэтому следует учесть только трение о грунт одной боковой стенки каждого диска. При этом

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

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

сила трения о грунт боковой стенки диска существенно меньше силы трения о грунт каждой боковой стенки диска при зажатом резании. Так как уменьшатся силы взаимодействия диска с грунтом, можно уменьшить толщину диска до $b = 8 \text{ мм}$ и сделать одностороннюю его заточку. Установлено, что полузажатое резание глины возможно, если расстояние между следами смежных рабочих органов не больше $b' = 12 \text{ мм}$ [4]. При увеличении расстояния между следами смежных рабочих органов резание глинистого грунта переходит в зажатое. Если осуществляется полузажатое резание, среднее удельное сопротивление грунта можно принять равным сопротивлению сдвига с поправкой на трение одной боковой стенки, то есть $k_{\text{эп-д}} = 0,3 \text{ МПа}$. Следует учесть также, что грунт при такой расстановке дисков будет измельчён, что приведёт к существенному уменьшению сопротивления перемещению ковшей (см. рисунок 1, а). Определим параметры дискового рыхлителя в зависимости от глубины разработки грунта a и необходимую силу тяги для его перемещения, если удельное сопротивление грунта $k_{\text{эп-д}} = 0,3 \text{ МПа}$. Допустим, диск при разработке грунта заглубляется по ступицу, диаметр которой 60 мм. Тогда минимальный диаметр диска

$$d = 2a + 60. \quad (1)$$

Из рисунка 3 имеем зависимости

$$l_{\text{мд}} = d; \tan \gamma = \frac{b'}{l_{\text{мд}}}; \tan \gamma = \frac{B}{2L}; \quad (2)$$

$$L = l_{\text{мд}} \cdot 2(n_{\text{д}} - 1) + d,$$

где $n_{\text{д}}$ – количество дисков на одной стороне технического средства.

Отсюда угол

$$\tan \gamma = \frac{b'}{l_{\text{мд}}} \rightarrow \gamma = \arctg \frac{b'}{l_{\text{мд}}}; \quad (3)$$

длина дискового рыхлителя

$$\tan \gamma = \frac{B}{2L} \rightarrow L = \frac{B}{2 \tan \gamma}; \quad (4)$$

его ширина

$$\tan \gamma = \frac{B}{2L} \rightarrow B = 2L \tan \gamma; \quad (5)$$

расчётное количество дисков

$$l_{\text{мд}} \cdot 2(n_{\text{д}} - 1) + d \rightarrow n_{\text{дпз}} - 1 = \frac{L-d}{2l_{\text{мд}}}. \quad (6)$$

Разделим отрезок АБ пополам (рисунок 4),

получим точку В. Проведя из неё перпендикуляр к отрезку АБ, получим точку Г приложения равнодействующей R к лезвию диска. Допустим, удельное сопротивление грунта не зависит от заглубления диска. Тогда направление равнодействующей будет перпендикулярно касательной к кромке лезвия диска. Так как сила – скользящий вектор, равнодействующая создаст момент сопротивления вращению диска на плече .

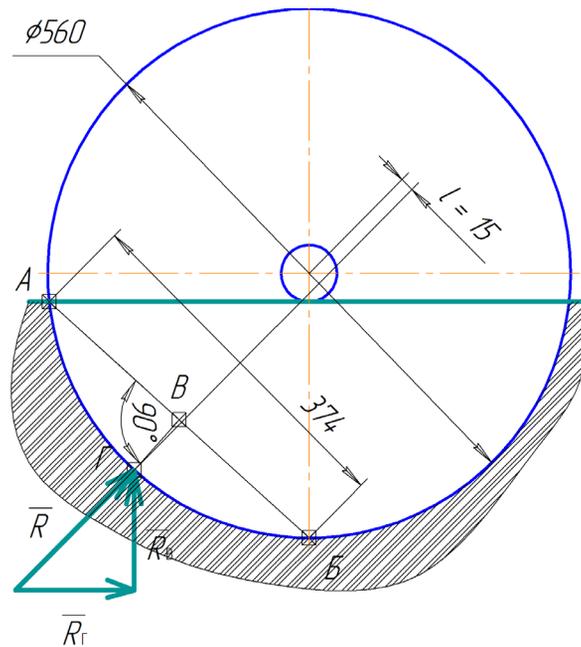


Рисунок 4 – К определению площади воздействия дискового рабочего органа на грунт

Figure 4 – To determine the area of impact of the disc working body on the ground

Из рисунка 4 определим площадь воздействия дискового рабочего органа на грунт

$$S_{\text{д-з}} = \text{АБ} \cdot b. \quad (7)$$

Равнодействующая

$$R = k_{\text{эп-д}} S_{\text{д-з}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{эп-д}}$ – удельное сопротивление грунта. Момент сопротивления вращению диска

$$M = Rl. \quad (9)$$

Разложим равнодействующую R на горизонтальную и вертикальную составляющую $R_{\text{г}} = R_{\text{з}}$.

Необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта

$$F_{трез} = R_{эпер} + R_{э}n_{дпз}, \quad (10)$$

где $R_{эпер}$ – горизонтальная составляющая сопротивления грунта переднему диску; $n_{дпз}$ – количество дисков, осуществляющих полужазаемое резание

Массу дискового рыхлителя уравновешивает суммарная вертикальная составляющая $R_{\Sigma э} = \Sigma R_{э}$ с сопротивления грунта и вертикальная реакция опорных колёс. Допустим, коэффициент сопротивления качению колёс дискового рыхлителя: $f_{скэу}$. Сила тяжести дискового рыхлителя, приходящаяся на опорные колёса, $P_{ок}$. Тяговое усилие на перемещение дискового рыхлителя

$$P_{пдр} = f_{скэу}P_{ок}. \quad (11)$$

Общее тяговое усилие равно сумме сил тяги для резания грунта и усилия на перемещение дискового рыхлителя

$$F_{др} = F_{трез} + P_{пдр}. \quad (12)$$

Анализ затрат энергии рискового рыхлителя невозможно осуществить, не имея хотя бы ориентировочных значений кинематических параметров. Диск вращается от трения о грунт. Угловую скорость диска $\omega_{д}$ определяет средневзвешенная окружная скорость $v_{сэ}$, то есть окружная скорость точки А на диске, расположенной в центре сегмента погружённой в грунт части диска (рисунок 5).

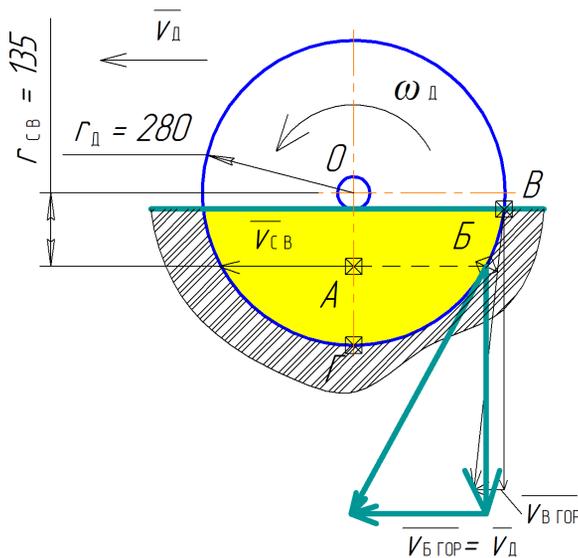


Рисунок 5 – К выявлению точки на диске, определяющей его угловую скорость

Figure 5 – To identify the point on the disk that determines its angular velocity

Допустим, скорость поступательного перемещения диска равна средневзвешенной окружной скорости: $v_{д} = v_{сэ}$. Отсюда угловая скорость диска

$$\omega_{д} = \frac{v_{сэ}}{r_{сэ}}. \quad (13)$$

Любая точка на кромке лезвия, например точка Г, будет иметь окружную скорость

$$v_{Г} = \omega_{д} r_{д}. \quad (14)$$

Там, где горизонтальная составляющая вектора окружной скорости точки кромки лезвия будет равна скорости агрегата, не будет горизонтального проскальзывания кромки лезвия относительно частиц грунта. Положение точки В на кромке лезвия диска, в которой не будет горизонтального проскальзывания кромки лезвия относительно частиц грунта, будет на одной горизонтали с точкой А. Приложим к точке В на кромке лезвия диска вектор скорости $v_{Г}$. Спроецируем его на горизонтальное и вертикальное направление. Получим ниже теорему.

Следует учесть, что в действительности точки А и В будут расположены ниже теоретических по трём причинам. Во-первых, в среднем удельная сила трения о грунт фасок лезвия, то есть сила трения отнесённая к единице площади, превышает удельную силу трения боковых поверхностей диска. Это обусловлено тем, что, за исключением нижней точки Г диска, фаски лезвия расположены под некоторым углом к вектору скорости диска. При этом часть поверхности фаски диска, обращённая в сторону движения агрегата, воспринимает также напор грунта. Во-вторых, с увеличением расстояния от центра вращения к периферии диска увеличивается плечо действующих сил трения. В-третьих, как правило, с увеличением глубины увеличивается плотность грунта, следовательно, увеличивается его сила трения. Поэтому принятое допущение следует оценивать как чисто теоретическое, способствующее пониманию процесса взаимодействия диска с грунтом. Положение точек А и В на рисунке 5 следует рассматривать как наивысшее. Отсюда вычисленную угловую скорость диска следует рассматривать как максимальную. Действительная угловая скорость диска будет меньше и зависит от очень многих факторов. Кроме того, она будет непостоянной.

Как видно из построений, кромка лезвия диска во всех положениях осуществляет резание со значительным скольжением. Это, с

одной стороны, является преимуществом резания грунта диском. С другой стороны, теоретически без проскальзывания относительно грунта в любое мгновение находится только точка, совпадающая с точкой А диска. Остальные участки боковых поверхностей диска проскальзывают относительно грунта, увеличивая затраты энергии на его резание.

Для разработки одного кубического метра грунта агрегат в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя должен переместиться на расстояние

$$l_{\partial p} = \frac{1}{aB}, \quad (15)$$

где a – заглубление диска; B – ширина дискового рыхлителя.

Время перемещения диска на это расстояние

$$\tau_{\partial p} = \frac{l_{\partial p}}{v_{\partial}}, \quad (16)$$

где v_{∂} – скорость дискового рыхлителя.

За один час агрегат разработает грунт площадью

$$S_{\text{ч}\partial p} = 3600 Bv_{\partial}. \quad (17)$$

За 8-часовую рабочую смену агрегат разработает грунт площадью $S_{8\text{ч}\partial p}$. Так как для создания фронта работ агрегату для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги агрегат в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя должен сделать 7 проходов, то за один час работы он разработает грунт для формирования подстилающего слоя будущей автодороги на расстоянии

$$L_{\text{ч}\partial p} = 3600 \frac{v_{\partial}}{7}; \quad (18)$$

за рабочую смену

$$L_{8\text{ч}\partial p} = 8 L_{\text{ч}\partial p}. \quad (19)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, диски заглублены на $a = 250$ мм. Тогда минимальный диаметр диска (1)

$$d = 2 \cdot 250 + 60 = 560 \text{ мм.}$$

Зависимость минимального диаметра дисков от их заглубления на рисунке 6.

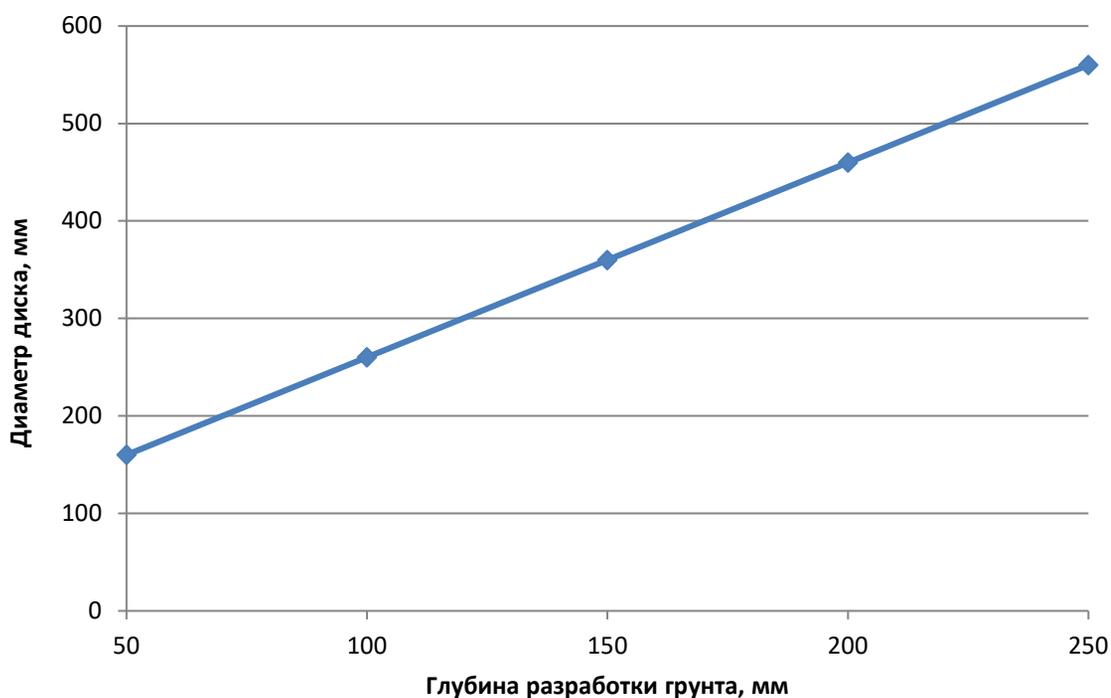


Рисунок 6 – Зависимость минимального диаметра диска от глубины разработки грунта

Figure 6 – Dependence of the minimum diameter of the disk on the depth of soil development

Допустим, рассматриваемый дисковый рыхлитель должен разрабатывать грунт на всю ширину захвата агрегата (см. рисунок 1, а) 7 м. С учётом внедрения ковшей в грунт и выхода их из грунта теоретическая ширина дискового рыхлителя

$$B_m = 7 + 2 \cdot 0,108 = 7,216 \text{ м.}$$

Из зависимостей (2), когда диски заглублены на 250 мм:

$$l_{m\delta} = d = 0,56 \text{ м;}$$

угол (3)

$$\gamma = \arctg \frac{0,012}{0,56} \approx 1,23^\circ;$$

расчётная длина дискового рыхлителя (4):

$$L = \frac{7,216}{2 \cdot 0,00214} \approx 180 \text{ м.}$$

Такая длина дискового рыхлителя очень велика, поэтому ограничимся $L \leq 25$ м. Тогда ширина дискового рыхлителя (5):

$$B = 2 \cdot 25 \cdot 0,0214 = 1,07 \text{ м.}$$

Количество проходов дискового рыхлителя для обеспечения работы агрегата непрерывного действия (см. рисунок 1, а): $7,216 : 1,07 = 6,74$. Примем количество проходов равным 7.

Расчётное общее количество дисков (6):

$$n_{\delta пз} = \frac{25-0,56}{2 \cdot 0,56} - 1 = 21,8 - 1 = 20,8 \text{ шт.}$$

Так как передний диск осуществляет зажатое резание (см. рисунок 3), а остальные установлены попарно, учитывая принятое увеличенное количество проходов, количество дисков, осуществляющих полузажатое резание $n_{\delta пз} = 20$.

Толщина диска, осуществляющего полузажатое резание, $b = 8$ мм. Передний диск осуществляет зажатое резание грунта. Чтобы следующие за ним диски могли сдвинуть грунт в свободное пространство, созданное передним диском, его толщина должна быть в два раза больше толщины остальных дисков: $b_{пер} = 8 \cdot 2 = 16$ мм.

Площадь воздействия дискового рабочего органа на грунт (7), когда передний диск заглублён на 250 мм (см. рисунок 4),

$$S_{\delta-е} = 374 \cdot 16 = 5984 \text{ мм}^2.$$

Допустим, удельное сопротивление грунта перемещению переднего диска, с учётом трения о грунт боковых стенок, $k_{ер-\delta} = 1,0$ МПа. Равнодействующая (8):

$$R = 1 \cdot 5984 = 5984 \text{ Н.}$$

Момент сопротивления вращению диска (9):

$$M = 5984 \cdot 0,015 \approx 89,8 \text{ Нм.}$$

Разложим равнодействующую R на горизонтальную и вертикальную составляющую:

$$R_e = R_{е пер} = 5984 \cdot 0,707 \approx 4260 \text{ Н.}$$

Площадь воздействия на грунт диска, осуществляющего полузажатое резание (7),

$$S_{\delta-е} = 374 \cdot 8 = 2992 \text{ мм}^2.$$

Допустим, удельное сопротивление грунта дисков, осуществляющих полузажатое резание грунта, $k_{ер-\delta} = 0,3$ МПа. Равнодействующая (8):

$$R = 0,3 \cdot 2992 = 898 \text{ Н.}$$

Момент сопротивления вращению диска (9):

$$M = 898 \cdot 0,015 \approx 13,47 \text{ Нм.}$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие $R_e = R_e \approx 635$ Н.

Без учёта переднего диска количество дисков, осуществляющих полузажатое резание, $n_{\delta пз} = 20$. Необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта (10):

$$F_{т рез} = 4260 + 635 \cdot 20 = 16960 \text{ Н.}$$

На рисунке 7 показана зависимость силы тяги энергетического устройства для резания грунта дисковым рыхлителем от глубины разработки грунта.

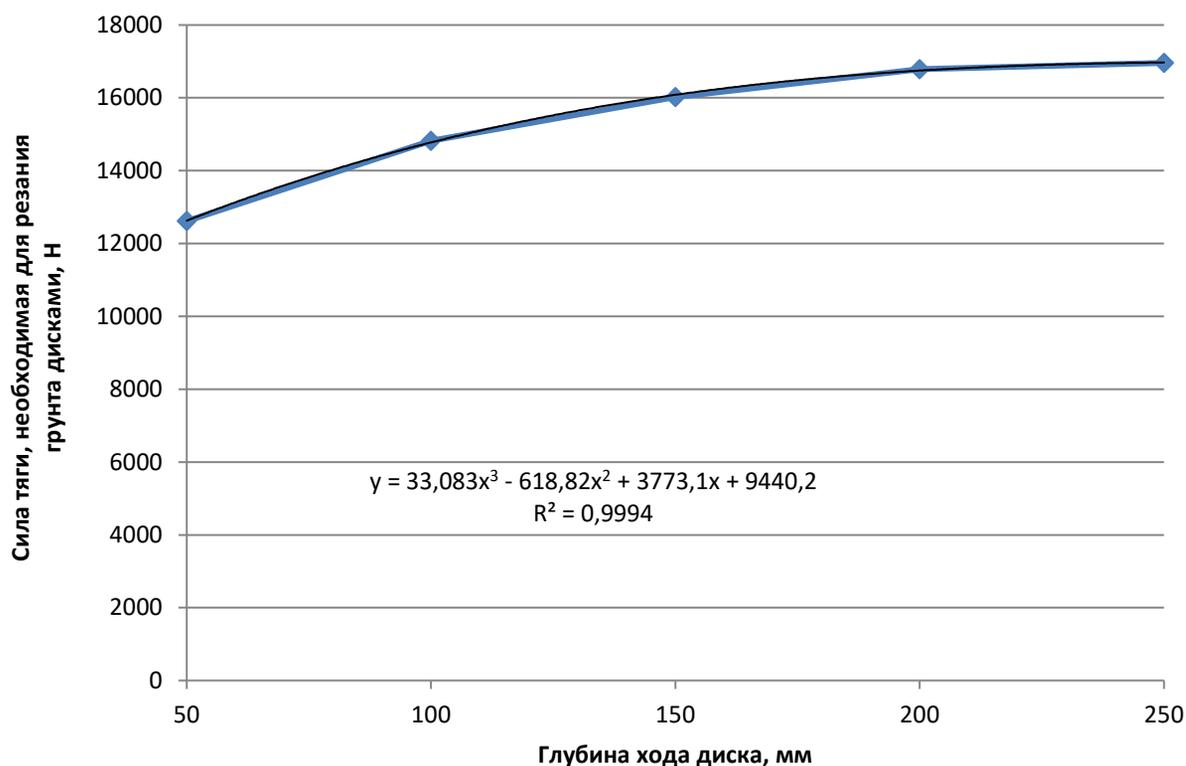


Рисунок 7 – Зависимость силы тяги энергетического устройства для резания грунта от глубины разработки грунта

Figure 7 – Dependence of the thrust force of the energy device for cutting the soil on the depth of soil development

Допустим, коэффициент сопротивления качению колёс дискового рыхлителя $f_{с\kappa\epsilon y} = 0,2$. Сила тяжести дискового рыхлителя, приходящаяся на опорные колёса, $P_{ок} = 1000$ Н. Усилия на перемещение дискового рыхлителя (11):

$$P_{п\partial p} = 0,2 \cdot 1000 = 200 \text{ Н.}$$

Общее тяговое усилие (12):

$$F_{\partial p} = 16960 + 200 = 17160 \text{ Н.}$$

Допустим, средневзвешенная окружная скорость диска (см. рисунок 5) $v_{\partial} = v_{с\epsilon} = 2$ м/с. Отсюда угловая скорость диска (13):

$$\omega_{\partial} = \frac{2}{0,135} = 14,96 \text{ рад/с.}$$

Окружная скорость точки на кромке лезвия диска (14):

$$v_{\Gamma} = 14,96 \cdot 0,28 = 4,19 \text{ м/с.}$$

Окружная скорость точки Γ кромки лезвия превышает скорость перемещения оси диска более чем в два раза. Следовательно, в точке Γ кромка лезвия диска опережает скорость агрегата. Лезвие будет осуществлять резание со скольжением только в нижней части, погружённой в грунт. В точке B погружения кромки лезвия в грунт горизонтальная составляющая вектора окружной скорости точки кромки лезвия, из построения $v_{B\text{гор}} = 0,555$ м/с; $v_{B\text{гор}} \ll v_{\partial}$. В точке B горизонтальная составляющая кромки лезвия диска значительно меньше скорости агрегата. Лезвие также будет осуществлять резание со скольжением относительно грунта, преимущественно по вертикали. В горизонтальном направлении режим резания будет близок к рубке [2].

Для разработки одного кубического метра грунта агрегат в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя должен переместиться на расстояние (15):

$$l_{\partial p} = \frac{1}{0,25 \cdot 1,07} \approx 3,738 \text{ м.}$$

Время перемещения (16):

$$\tau_{\partial p} = \frac{3,738}{2} = 1,85 \text{ с.}$$

За один час агрегат разработает грунт площадью (17):

$$S_{\text{ч}\partial p} = 3600 \cdot 1,07 \cdot 2 = 7781 \text{ м}^2 = 0,778 \text{ га.}$$

За 8-часовую рабочую смену агрегат разработает грунт площадью $S_{8\text{ч}\partial p} = 6,22 \text{ га.}$ Так как для создания фронта работ агрегату для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги агрегат в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя должен сделать 7 проходов, то за один час работы он разработает грунт для формирования подстилающего слоя будущей автодороги на расстоянии (18):

$$L_{\text{ч}\partial p} = 3600 \frac{2}{7} = 1039 \text{ м;}$$

за рабочую смену (19):

$$L_{8\text{ч}\partial p} = 8 L_{\text{ч}\partial p} = 8 \cdot 1039 = 8310 \text{ м.}$$

Агрегат для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги перемещается за рабочую смену на расстояние 2448 метра. Поэтому агрегат в составе дополнительного энергетического устройства с дисковым рыхлителем обеспечит за смену фронт работ агрегату для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги на: $8310 : 2448 \approx 3,4$ рабочих смены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как в составе агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог диски будут осуществлять зажатое резание грунта, для предварительного рыхления грунта дисками более целесообразно использовать отдельный агрегат, включающий энергетическое устройство и дисковый рыхлитель. На основании проведённых теоретических исследований выявлена необходимая сила тяги энергетического устройства для резания грунта $F_{\text{мрез}} = 16960 \text{ Н}$ и общее тяговое усилие $F_{\partial p} = 17160 \text{ Н}$, необходимое для перемещения дискового рыхлителя. Производительность агрегата $S_{\text{ч}\partial p} = 0,778 \text{ га/час.}$ Для сопоставления затрат энергии на резание грунта пассивными дисками и долотообразными рабочими органами следует произвести теоретический анализ затрат энергии на работу пассивных дисков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшем 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. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. № 6. С. 676–688.
4. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. Карнаузов 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.
6. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. 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.
8. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. 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.
10. 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.
11. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.
12. 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. P. 421-428.
13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142-166.
14. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. P. 150-163.
15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96-103.
16. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.

17. 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.

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

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

20. 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.

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

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

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

24. 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.

25. 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 sepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilayushchego sloya avtodorogi [Determination of the speed of the chains and the size of the soil layer cut 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 cantilever knife blade with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 2: 172-181. (In Russian)

3. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstvija dlja formirovaniya podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 6: 676-688. (In Russian)

4. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchytom uprugih deformacij pri razrushenii [De-

termination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction] *Construction and road machinery*, 2008. 4: 36-42. (In Russian)

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

6. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoz [Determination of the critical cutting depth for combined cutting of soils with a hydrophreeze]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)

7. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin. *Construction and road machinery*, 2010. No11. Pp. 44-48. (In Russian).

8. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu. *Construction and road machinery*, 2010. No 11. Pp. 34-38.

9. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofreznyh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlyh gruntov. *Construction and road machinery*, 2012. No 8. Pp. 42-44.

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

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

12. 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.

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

14. 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.

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

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

17. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*, 2017. 2: 12-15.

18. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Development of the soil with a scraper in the conditions of free cutting]. *Construction and road machines*, 2016. 2: 7-10.

19. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya

[Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016. 11: 18-20.

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

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

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

23. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotor-noj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the composition

of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 5: 32-39. (In Russian)

24. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 1: 47-54. (In Russian)

25. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *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».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department.

Научная статья

УДК 622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-488-496>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ДЛЯ ПОДКОПА ТРУБОПРОВОДА

И.С. Кузнецов

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

dissovetsibadi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение трубопроводного транспорта для перемещения углеводородного сырья, нефтепродуктов является основной стратегической системой России с огромным объемом грузооборота. Доля трубопроводного транспорта в грузообороте транспортной системы России составляет свыше 48%. Проведение сервисных работ трубопроводной системы невозможно без использования средств механизации и специального оборудования. Так, для восстановления ее работоспособного состояния используют различные варианты комплектов машин.

Реализация методики. В результате проведенных исследований подобран комплект машин для выполнения технологических операций капитального ремонта участка стального магистрального трубопровода. Рассчитаны основные технико-экономические показатели, с учетом которых обоснована эффективность и целесообразность использования комплекта машин.

Результаты. Определена экономическая эффективность комплекта ремонтно-строительной колонны, включающей гидравлический экскаватор с разработанным фрезерным рабочим оборудованием, новизна которого подтверждена патентами на полезную модель РФ.

Обсуждение и заключение. Направлениями дальнейших исследований является расчет и обоснование необходимых режимных параметров для внедрения в эксплуатацию фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экскаватор гидравлический, оборудование рабочее, фреза роторная, трубопровод, ремонт, подкоп, эффективность экономическая

БЛАГОДАРНОСТИ: автор благодарит за поддержку научных исследований коллектив кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 07.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Кузнецов И.С. Анализ экономической эффективности применения фрезерного рабочего оборудования экскаватора для подкопа трубопровода // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т.18, № 5(81). С. 488-496. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-488-496>

© Кузнецов И.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-488-496>

COMPARATIVE ANALYSIS OF ECONOMIC EFFICIENCY APPLICATION OF MILLING EXCAVATOR WORKING EQUIPMENT FOR PIPELINE UNDERMINING

Ilya S. Kuznetsov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Russia, Omsk
dissovetsibadi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>

ABSTRACT

Introduction. The use of pipeline transport for the movement of hydrocarbons and petroleum products is the main strategic system of Russia with a huge volume of cargo turnover. The share of pipeline transport in the freight turnover of the Russian transport system is over 48 %. Maintenance of the pipeline system is impossible without the use of mechanization and special equipment. So, to restore its working condition, various options for sets of machines are used.

Implementation of the methodology. As a result of the research carried out, a set of machines was selected for performing the technological operations of the overhaul of a section of the steel main pipeline. The main technical and economic indicators are calculated, taking into account the efficiency and expediency of using a set of machines.

Results. The economic efficiency of a set of machines, including a hydraulic excavator with a developed milling working equipment, the novelty of which is confirmed by patents for a useful model of the Russian Federation, has been determined.

Discussion and conclusions. The directions of further research are the calculation and substantiation of the necessary operating parameters for the introduction into operation of the milling working equipment of a hydraulic excavator.

KEYWORDS: hydraulic excavator, working equipment, rotary cutter, pipeline, repair, digging, economic efficiency.

GRATITUDES. The author thanks the Equipment for Construction and Service of Oil and Gas Complexes and Infrastructures Department (SibADI) and reviewers of the article for the support in scientific research.

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Kuznetsov I.S. Comparative analysis of economic efficiency application of milling excavator working equipment for pipeline undermining // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 488-496. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-488-496>

© Kuznetsov I.S., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В «Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года»¹ указана необходимость повышения эффективности, надежности, доступности и качества удовлетворения внутреннего спроса на все энергоресурсы. Реализация стратегии позволит значительно повысить добычу нефти и газа в Восточной Сибири, в Арктике и на Дальнем Востоке, увеличить долю эксплуатации технологического оборудования. Это задача решается как строительством новых нефтегазопроводов, так и поддержанием в исправном и работоспособном состоянии действующих трубопроводных систем [1, 2, 3].

Для выполнения операций технического обслуживания и ремонта магистральных трубопроводов необходимы большие финансовые и трудовые вложения [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Одним из путей снижения экономических затрат при технической эксплуатации трубопроводных систем является обеспечение механизации всех видов работ.

Ремонт трубопроводов диаметром 219...720 мм, не имеющих дефектов стенок и дефектов сварных швов, может производиться подъемом трубопровода без остановки перекачки. Допустимое давление на участке подъема можно определить расчетом на прочность. Оно не должно превышать 2,5 МПа. Ремонт трубопроводов, имеющих дефекты стенок и сварных швов, проводится после выполнения восстановительных работ. Для проведения восстановительных работ трубопровод укладывают на лежки в траншее².

Схема ремонтного котлована представлена на рисунке 1.

Технологические операции при выполнении выборочного ремонта совершаются в следующей последовательности [12,13,14, 15, 16]:

- 1) уточнение положения трубопровода при помощи трассоискателя;
- 2) уточнение границ ремонтируемого участка трубопровода;

3) снятие и перемещение почвенно-растительного слоя грунта во временный отвал;

4) вскрытие трубопровода с последующей разработкой траншеи вдоль трубопровода;

5) разработка и удаление грунта под трубопроводом (с грунтовыми опорами или без них);

6) визуальный осмотр дефектного участка трубопровода с применением дополнительных методов контроля при необходимости;

7) вырезка дефектного участка;

8) установка и сварка заменяемого участка трубопровода;

9) засыпка с подбивкой грунта под трубопровод;

10) засыпка траншей трубопровода грунтом с последующей рекультивацией плодородного слоя почвы.

Для проведения земляных работ, имеющих высокую трудоемкость капитального ремонта нефтегазопроводов, разработаны различные варианты ремонтно-строительных комплектов машин [17, 18, 19].

Предлагаем разработку и удаление грунта под трубопроводом выполнять фрезерным рабочим оборудованием, навешиваемым на гидравлический экскаватор³ [20]. Применение такого оборудования позволит значительно увеличить степень механизации земляных работ, энергоэффективность процесса разработки грунта. Для обоснования технико-экономической эффективности использования фрезерного оборудования проведены дополнительные исследования.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ

Из существующих вариантов комплектации технических средств ремонта трубопроводов выбраны два наиболее перспективных варианта, условно обозначенные РСК-1 и РСК-2, и проведён их сравнительный анализ.

При выборе комплектов машин необходимо выполнять следующие условия^{4,5,6,7}[21]:

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года [Электронный ресурс]: утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р. Доступ из справочной правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 18.09.2021).

² РД 39-00147105-015-98 «Правила капитального ремонта магистральных нефтепроводов» – М.: ОАО «АК «Транснефть», 1998. 148 с.

³ Пат. № 182718: МПК Е 02 F 3/06 : Рабочее оборудование одноковшового экскаватора / А.И. Демиденко, И.С. Кузнецов; СибАДИ. № 2018114359; заявл. 18.04.2018 ; опубли. 29.08.2018, Бюл. № 25.

⁴ Аникин Е.А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. – Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.

⁵ Баталин Ю.П. Организация строительства магистральных трубопроводов / Ю.П. Баталин, В.Л. Березин, Л.Г. Телегин, Б.Н. Курепин – Москва: Недра, 1980. 344 с.

⁶ Салюков В.В. Ремонт локальных участков трубопровода / В.В. Салюков, Н.Х. Халлыев, В.Г. Селиверстов и [др.] – Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

⁷ Мустафин Ф.М. Технология сооружения газонефтепроводов / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков – Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.

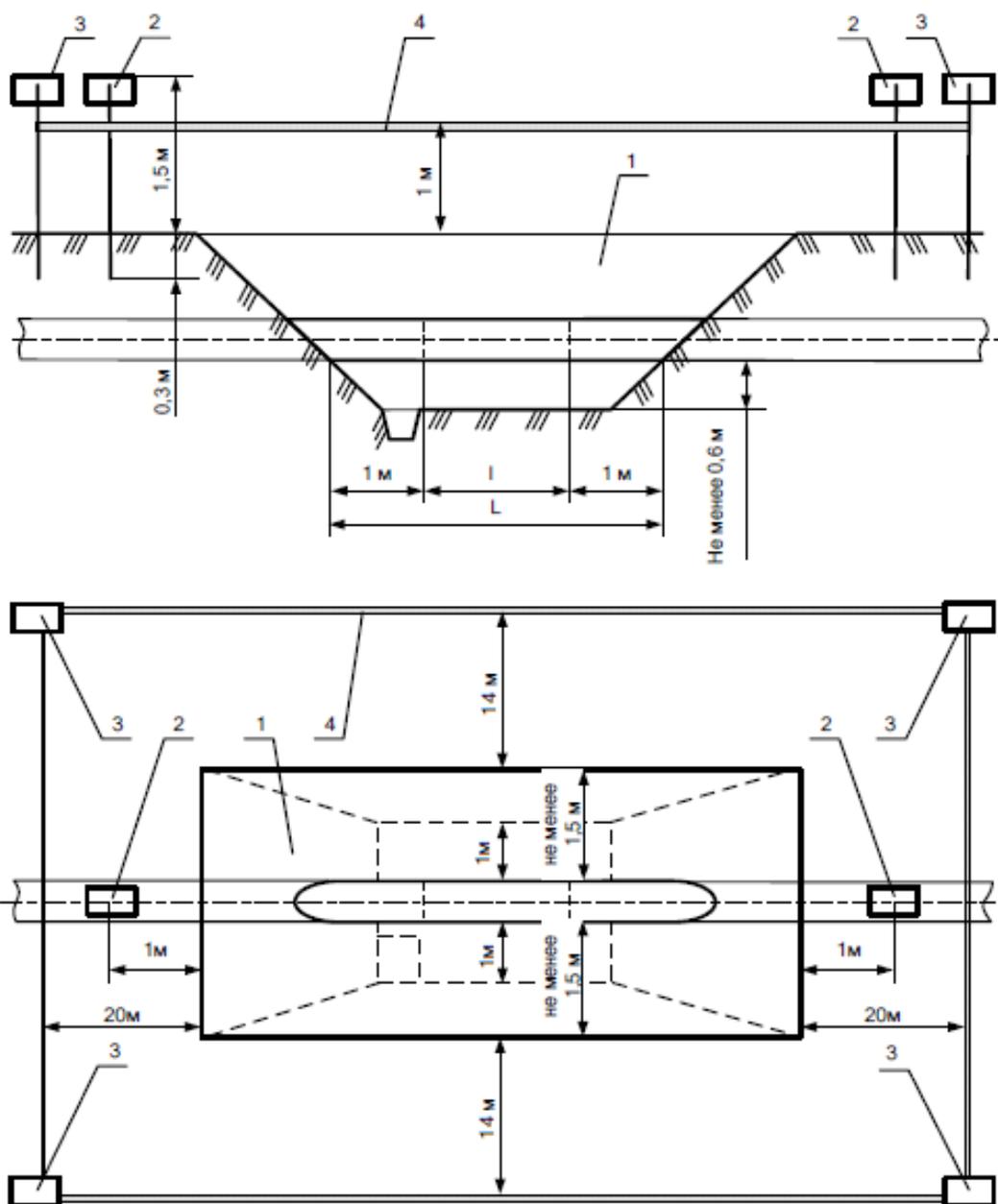


Рисунок 1 – Схема ремонтного котлована:
 1 – рабочий котлован; 2 – знак, указывающий наименование нефтепровода
 и фактическую глубину его заложения; 3 – предупредительные знаки,
 запрещающие проезд; 4 – сигнальная лента

Figure 1 – Scheme of the repair pit
 1 – working pit; 2 – sign indicating the name of the oil pipeline
 and the actual depth of its inception; 3 – warning signs,
 prohibiting passage; 4 – signal tape

- количество машин должно быть минимальным, их параметры и конструкции соответствовать условиям работы и габаритам ремонтного участка;

- организация производства работ зависит от ведущих машин комплектов;

- состав комплектов машин должен обеспе-

чивать непрерывность технологического процесса.

Составы комплектов машин для выполнения земляных работ во время выполнения капитального ремонта магистрального нефтепровода представлены в таблице 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общий объем земляных работ при разработке котлована вдоль трубопровода

$$V_{\text{общ}} = \frac{B_1+B_2}{2} \cdot H \cdot L - V_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{тр}}$ – объем, занимаемый трубопроводом на данном участке;

$$V_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L.$$

$$V_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot 0,72^2}{4} \cdot 15 = 6,1 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Откуда общий объем земляных работ

$$V_{\text{общ}} = \frac{3,12+4,12}{2} \cdot 2,12 \cdot 15 - 6,1 = 109 \text{ м}^3.$$

В таблице 2 представлена эксплуатационная сменная производительность, объем работ и необходимое время выполнения операций для каждой из машин комплектов 1 и 2. Время выполнения операций зависит от отношения объема работ к производительности каждой из машин.

Исходя из общего объема выполняемых работ и времени выполнения определена соответствующая производительность машин, входящих в комплекты (см. таблицу 2).

Удельную металлоемкость определим отношением массы машин к длине ремонтируемого участка

$$M_e = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{L}, \quad (3)$$

где M_i – масса машины.

Таблица 1
Варианты ремонтно-строительных комплектов машин для выполнения земляных работ во время капитального ремонта магистрального трубопровода

Table 1
Variants of repair and construction sets of machines for excavation work during the overhaul of a main pipeline

№ операции	Наименование операции	Средства механизации	
		Комплект машин 1	Комплект машин 2
1	Снятие почвенно-растительного слоя и перемещение его в отвал	Бульдозер Cat D6R2	Бульдозер Cat D6R2
2	Разработка траншей вдоль ремонтируемого нефтепровода	Экскаватор Volvo EC250D	Экскаватор Volvo EC250D
3	Разработка грунта под нефтепроводом	Машина для подкопа МПТ-720	Экскаватор Volvo EC250D с навесным оборудованием – роторная фреза
		Трубоукладчик Cat PL72	
		Передвижная электростанция ЭД-100-Т400-1РПМ11	

Таблица 2
Производительность машин, участвующих в ремонте трубопровода

Table 2
Productivity of machines involved in pipeline repair

Наименование средства механизации	Объем работ, м ³	Время на выполнение операции, ч	Производительность, м ³ /ч
Бульдозер Cat D6R2	32,58	0,14	233,4
Экскаватор Volvo EC250D	66,32	0,71	93,3
Машина для подкопа МПТ-720	10,1	0,1	100,8
Роторная фреза на базе одноковшового экскаватора	0,28	0,14	2
Итого:	109	0,95–0,99	-

В процессе подкопа трубопровода в первом комплекте используют следующие машины: трубоукладчик Cat PL72, передвижная электростанция ЭД-100-Т400-1РПМ11 и машина для подкопа МПТ-720. Во втором комплекте машин применяют экскаватор Volvo EC250D с навесным фрезерным рабочим оборудованием.

Для расчета экономической эффективности предлагаемого комплекта машин необходимо определить удельные приведенные затраты на производство. Для этого предварительно необходимо знать себестоимость единицы продукции и удельные капитальные затраты.

Себестоимость единицы продукции рассчитаем по формуле

$$C_e = \frac{H \cdot \sum_{i=1}^n C_i}{L}, \quad (4)$$

где H – накладные расходы на транспортировку и обслуживание; C_i – стоимость машино-смены.

Удельные капитальные затраты рассчитаем по следующей формуле:

$$K_{уд} = \frac{a \cdot \sum_{i=1}^n K_i}{L}, \quad (5)$$

где a – коэффициент, учитывающий затраты на транспортирование машины от завода изготовителя до покупателя; K_i – стоимость машины.

Удельные приведенные затраты на производство работ:

$$K_{уд} = C_e + E_H \cdot K_{уд},$$

где E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Наибольшая эффективность предложенного рабочего оборудования достигается при проведении местного ремонта трубопровода. Для расчета примем протяженность ремонтируемого участка L , равную 15 м. Диаметр ремонтируемого трубопровода $D = 720$ мм. Ширина котлована для проведения ремонтных работ зависит от диаметра трубопровода, ширины ковша экскаватора, наклона боковых стенок и защитного слоя грунта вокруг трубопровода. Ширина ремонтного котлована по

дну составит $B_1 = 3120$ мм, а в верхней части $B_2 = 4120$ мм. Глубина ремонтного котлована $H = 2120$ мм.

Как показывает анализ результатов расчета, первый комплект машин обеспечивает выполнение основных операций за меньшие временные затраты. Однако следует принять во внимание дополнительное время на подготовку к работе машины МПТ-720 для подкопа трубопровода. Для ее установки на трубопровод нужно предварительно очистить место установки на трубопровод шанцевым инструментом, так как механизированное удаление грунта ближе, чем в 200 мм от трубопровода запрещено. Для подготовки места установки подкапывающей машины необходимо 0,5 ч. Кроме того, для эффективной работы подкапывающей машины необходимо углубить прямки траншеи для удаления грунта, расположенного под трубопроводом. Дополнительный объем работ одноковшовым экскаватором составит 9 м³.

Однако и второму комплекту необходимо дополнительное время, которое не было учтено в предварительном расчете. Для замены ковша экскаватора на фрезерное рабочее оборудование необходимо 0,2 ч.

С учетом дополнительного времени первый комплект выполнит заданный объем работ за 1,55 ч, а второй комплект затратит 1,2 ч (рисунок 2).

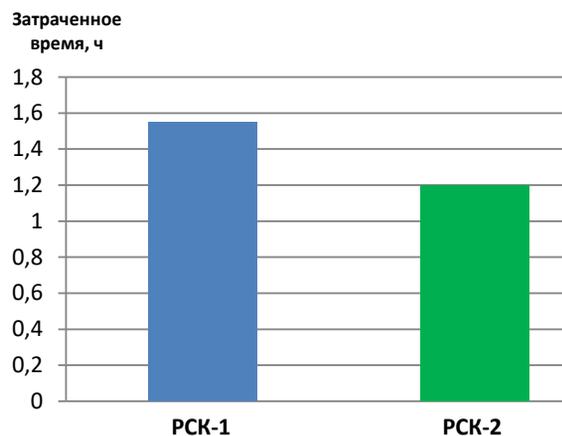


Рисунок 2 – Сравнительные диаграммы времени на выполнение операций

Figure 2 – Comparison charts of time to perform operations

Сводные данные о стоимости комплектов машин и технические характеристики приведены в таблице 3.

Разность стоимости комплектов составляет 3100 тыс. руб.

Исходя из формулы (3), металлоемкость первого комплекта машин

$$M_e = \frac{(31,278+1,93+4)}{15} = 2,48 \text{ т/м.}$$

Металлоемкость второго комплекта

$$M_e = \frac{(27,5+0,3)}{15} = 1,85 \text{ т/м.}$$

Как видно, металлоемкость первого комплекта на 34% больше, чем второго.

Из зависимости (4) себестоимость первого комплекта

$$C_e = \frac{1,1 \cdot (35+2,5+2,5)}{15} = 2,93 \text{ тыс. руб./м.}$$

Себестоимость второго комплекта

$$C_e = \frac{1,1 \cdot (18,5+2,5)}{15} = 1,54 \text{ тыс. руб./м.}$$

Себестоимость выполнения работ при применении фрезерного рабочего оборудования на 90% меньше, чем при применении роторной подкапывающей машины.

Удельные капитальные затраты первого комплекта

$$K_{уд} = \frac{1,05 \cdot (16000 + 1000 + 2750 + 28000 + 850)}{15} = 4032 \text{ тыс. руб./м}$$

Удельные капитальные затраты второго комплекта

$$K_{уд} = \frac{1,05 \cdot (16000 + 1000 + 28000 + 500)}{15} = 3815 \text{ тыс. руб./м}$$

Таблица 3
Техническая характеристика и стоимость машин

Table 3
Technical characteristics and cost of machines

Наименование средства механизации	Масса, т	Стоимость, тыс. руб.	Стоимость машино-смены, руб.	Количество, шт.	Итого:	
					Комплект машин 1, тыс. руб.	Комплект машин 2, тыс. руб.
Бульдозер Cat D6R2	18,194	16 000	20 000	1	16 000	16 000
Экскаватор Volvo EC250D	27,5	10 000	18 000	1	10 000	10 000
Машина для подкопа МПТ-720	4,0	2 750	8 000	1	2750	0
Трубоукладчик Cat PL72	31,278	14 000	35 000	2	28 000	28 000
Передвижная электростанция ЭД-100-Т400-1РПМ11	1,93	850	2 500	1	850	0
Навесное фрезерное рабочее оборудование экскаватора	0,3	500	2 500	1	0	500
Итого:	-	-	-	-	57 600	54 500

Удельные капитальные затраты комплекта машин, в котором используется машина для подкопа «МПП-720» на 6% больше, чем комплекта машин с применением навесного фрезерного рабочего оборудования экскаватора.

Удельные приведенные затраты первого комплекта составят

$$K_{уд} = 2,93 + 4032 \cdot 0,15 = 607,73 \text{ тыс. руб./м}$$

Удельные приведенные затраты второго комплекта

$$K_{уд} = 1,54 + 3815 \cdot 0,15 = 573,79 \text{ тыс. руб./м}$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного сравнительного анализа комплектов машин выявлено:

а) применение второго комплекта машин, включающего фрезерное рабочее оборудование одноковшового экскаватора вместо роторной подкапывающей машины для подкопа трубопровода, экономически целесообразно и эффективно;

б) экономия времени при выполнении заданного объема работ составляет 0,35 ч;

в) стоимость комплекта машин с использованием фрезерного рабочего оборудования на 3100 тыс. руб. меньше;

г) металлоемкость оборудования для подкопа трубопровода больше на 34% в первом комплекте машин, в который входит роторная подкапывающая машина;

д) удельные капитальные затраты при использовании второго комплекта машин на 6% меньше, чем у первого комплекта машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аладинский В.В., Малков А.Г., Ушаков А.В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
3. Зорин Е.Е., Толстов А.Э., Ефимов В.М. Напряженно-деформированное состояние трубопроводов подземной прокладки в условиях криолитозоны // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 9. С. 9–12.
4. Куркин А.С., Бровко В.В., Пономарев П.А. Особенности ремонтных конструкций и технологий, их сварки при ремонте магистральных трубопроводов без замены // Журнал нефтегазового строительства. 2015. № 1. С. 40–43.

5. Черняев К.В. Мониторинг технического состояния нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 2000. № 9. С. 14–17.

6. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017. № 1. pp. 82–83.

7. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // Eng. Struct. 33 (5) (2011) 1423–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001

8. Archibald I.C. Soil stabilizer // Pipeline and gas Journal. 1984. No 11. pp. 44–46.

9. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. pp. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.

10. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015, Vol. 40, Iss. 11. pp. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.

11. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // Frontiers in Energy. Issue 2. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0672-5>.

12. Charru F. Hydrodynamic Instabilities. Cambridge University Press, 2011. 391 p.

13. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // Applied Metallurgy and Corrosion Control. 2017. pp 269–347. doi: 10.1007/978-981-10-4684-1-9 269.

14. Набиев Р.Р. Обеспечение надёжности длительно эксплуатируемых нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 2010. № 12. С. 9–11.

15. Шарыгин Ю.М., Романцов С.В., Шарыгин А.М. Повышение прочности дефектных труб, усиленных композитными муфтами с болтовым соединением // Транспорт и подземное хранение газа. 2002. № 3. С. 104–107.

16. Лукьянов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтных конструкций магистральных трубопроводов // Сварка и контроль. 2013. С. 181–188.

17. Большаков А.М., Сыромятникова А.С., Алексеев А.А. Непроектные положения газопроводов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышленность. 2014. № 4. С. 66–69.

18. Емельянов Р.Т., Султанов Н.С., Закурдаев А.В., Скурихин Л.В. Моделирование динамики регулируемого гидромотора // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8. С. 181–185.

19. Пенчук В.А. Закономерности разрушения грунта рабочими органами машин для земляных работ // Известия ВУЗов. Строительство. 1999. № 1.

20. Демиденко А.И., Кузнецов И.С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020; 17(1): 12–21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>.

21. Мухамедова Д.Ч. Современные технические и технологические решения по повышению эффективности ремонта газопроводов // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 5 (28). С. 86–88.

REFERENCES

1. Aladinskiy V.V., Malkov A.G., Ushakov A.B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method of gas pipeline repair using used pipes]. *Territoriya Neftegaz*. 2009; 8: 56-60. (In Russian).
2. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avari po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft» [Dynamics of accidents on the damage caused on the linear part of the main oil pipelines of JSC Transneft]. *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii*. 2011; 4: 64-67. (In Russian).
3. Zorin Ye.Ye., Tolstov A.E., Yefimov V.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye truboprovodov podzemnoy prokladki v usloviyakh kriolitozony [Stress-deformed condition of underground gasket pipelines in cryolitosone conditions]. *Neft', gaz i biznes*. 2015; 9: 9-12. (In Russian).
4. Kurkin A. S., Brovko V.V., Ponomarev P.A. Osobennosti remontnykh konstruksiy i tekhnologii ikh svarki pri remonte magistral'nykh truboprovodov bez zameny [Features of repair structures and their welding technologies during repair of main pipelines without replacement]. *Zhurnal neftegazovogo stroitel'stva*. 2015; 1: 40-43. (In Russian)
5. Chernyayev K.V. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nefteprovodov [Monitoring of the technical condition of oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2000; 9: 14-17. (In Russian).
6. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // *Science Jamp Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017; 1: 82 - 83.
7. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modeling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // *Eng. Struct.* 33 (5) (2011) 1423-1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001.
8. Archibald I.C. Soil stabilizer // *Pipeline and gas Journal*. 1984; 11: 44-46.
9. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016: 9-43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.
10. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015; 40(11): 3273-3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.
11. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. Issue 2. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0672-5>.
12. Charru F. *Hydrodynamic Instabilities*. Cambridge University Press, 2011: 391.
13. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. 2017. pp 269-347. doi: 10.1007/978-981-10-4684-1-9 269.
14. Nabiyev R.R. Obespecheniye nadozhnosti dlitel'no ekspluatiruyemykh nefteprovodov [Ensuring reliability of long-term operated oil pipelines]. *Trubo provodnyy transport nefti*. 2010; 12: 9-11. (In Russian).
15. Sharygin YU. M., Romantsov S. V., Sharygin A. M. Povyseniye prochnosti defektnykh trub, usilennykh kompozitnymi muftami s boltovym soyedineniyem [Increased strength of defective pipes reinforced by composite couplings with bolted connection]. *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*. 2002; 3:104-107. (In Russian).
16. Luk'yanov A. A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya remontnykh konstruksiy magistral'nykh truboprovodov [Analysis of stress-strain state of repair structures of main pipelines]. *Svarka i kontrol'*. 2013: 181-188. (In Russian).
17. Bol'shakov A.M., Syromyatnikova A.S., Alekseyev A.A. Neproektnyye polozheniya gazoprovodov, prolzhennykh podzemnym sposobom v rayonakh mnogoletnemerzlykh gruntov // *Gazovaya promyshlennost'*. 2014; 4: 66-69. (In Russian).
18. Yemel'yanov R.T., Sultanov N.S., Zakurdayev A.V., Skurikhin L.V. Modelirovaniye dinamiki reguliruyemogo gidromotora [Simulation of controlled hydraulic motor dynamics] *Vestnik KrasGAU*. 2014; 8: 181-185. (In Russian)
19. Penchuk, V.A. Zakonomernosti razrusheniya grunta rabochimi organami mashin dlya zemlyanykh rabot // *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*, 1999; 1. (In Russian).
20. Demidenko A.I., Kuznetsov I.S. Sovershenstvovaniye konstruksii rabocheho oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora. Nauchnyy retsenziryemyy zhurnal The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17(1): 12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>. (In Russian).
21. Mukhammedova D. CH. Sovremennyye tekhnicheskiye i tekhnologicheskkiye resheniya po povysheniyu effektivnosti remonta gazoprovodov / D. CH. Mukhammedova. // *Molodoy uchenyy*. 2011; 1. 5 (28): 86-88. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Илья Сергеевич – студент факультета «Нефтегазовая и строительная техника».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ilya S. Kuznetsov – Student of the Oil and Gas and Construction Equipment Faculty.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-498-509>

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ЕГО КОНСТРУКЦИЮ

Б.С. Трофимов, Л.С. Трофимова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

trofim_bs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4812-8823>trofimova_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена планированию работы грузовых автомобилей, эксплуатационные характеристики которых позволяют перевозить грузы, различные по своим свойствам, за счет внесения изменений в конструкцию этих автомобилей. Целью исследования является разработка нового научно-методического подхода для планирования работы грузовых автомобилей, позволяющего учитывать соответствие контролируемых параметров автомобиля требуемым значениям при внесении изменений в конструкцию; планового объема технических воздействий требуемому объему по периодам эксплуатации автомобилей в определенных условиях; объема перевозок в договоре плановой выработки автомобилей на перевозку различных видов грузов.

Материалы и методы. Для планирования работы грузового автомобиля с учетом внесения изменений в его конструкцию требуется применение усовершенствованных методов оптимизации планирования работы грузового автотранспортного предприятия, представляющую собой взаимосвязь деятельности по перевозке грузов, техническому обслуживанию и текущему ремонту. Основой представленных материалов и методов являются научные работы отечественных и зарубежных ученых по эксплуатации автомобилей с внесением изменений в его конструкцию; основные положения Федеральных законов в части разрешений на эксплуатацию автомобилей. Методологической базой теоретических и экспериментальных исследований является системный анализ и логический анализ.

Результаты. Авторами разработан научно-методический подход планирования работы грузового автомобиля с учетом внесения изменений в его конструкцию для выполнения условий договоров и получения прибыли автотранспортным предприятием.

Обсуждение и заключение. Реализация и апробация научно-методического подхода были выполнены по алгоритму разработанной методики в условиях работы автотранспортного предприятия г. Омска. Была проведена процедура по получению свидетельства в ГИБДД после внесения изменений в конструкцию автомобиля КамАЗ-53212 с целью эксплуатации его в качестве самосвала, выполнен расчет затрат и прибыли для выполнения условий договоров при перевозке различных видов грузов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузовой автомобиль, автотранспортное предприятие, конструкция автомобиля, виды грузов, математическая модель, методика планирования

Статья поступила в редакцию 29.08.2021; одобрена после рецензирования 04.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Трофимов Б.С., Трофимова Л.С. Планирование работы грузового автомобиля с учетом внесения изменений в его конструкцию // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 498-509. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-498-509>

©Трофимов Б.С., Трофимова Л.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-498-509>

LORRY WORK PLANNING WITH CONSIDERATION OF ITS DESIGN MODIFICATION

Boris S. Trofimov, Ludmila S. Trofimova

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia
trofim_bs@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4812-8823>
trofimova_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the lorries work planning, the operational characteristics of which will make it possible to transport loads of different properties due to changes in the design of these vehicles. The purpose of the study is to develop a new scientific and methodological approach for planning the operation of trucks, which allows taking into account the compliance of a) the controlled parameters of the vehicle with the required values when making changes to the design, b) the planned volume of technical impacts to the required volume for the periods of operation of vehicles in certain conditions, c) the volume transportation in the contract for the planned production of vehicles for the transportation of various types of goods.

Materials and methods. To plan the work of a lorry, taking into account changes in its design, it is required to use improved methods for optimizing the planning of the work of a freight motor transport enterprise, which is the relationship of activities for the transportation of goods, maintenance and current repair. The basis of the presented materials and methods is the scientific work of domestic and foreign scientists on the operation of cars with changes in its design; the main provisions of the Federal Laws in terms of permits for the operation of vehicles. The methodological basis of theoretical and experimental research is system analysis and logical analysis.

Results. The authors have developed a scientific and methodological approach to planning the operation of a lorry, taking into account changes in its design to fulfill the terms of contracts and make a profit for the trucking company.

Discussion and conclusions. The implementation and testing of the scientific and methodological approach were carried out according to the algorithm of the developed methodology in the operating conditions of a motor transport enterprise in the city of Omsk. A procedure was carried out to obtain a certificate from the traffic police after changes were made to the design of the KamAZ-53212 vehicle in order to operate it as a dump truck, and a calculation of costs and profits was made to fulfill the terms of contracts for the transportation of various types of goods.

KEYWORDS. lorry, trucking company, vehicle design, types of cargo, mathematical model, planning technique.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors would like to thank the staff of the Organisation of Transportation and Transport Management Department, Operation and Repair of Automobiles Department, SibADI, as well as the reviewers of the article for their support of scientific research.

The article was submitted 29.08.2021; approved after reviewing 04.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Trofimov B.S., Trofimova I.S. Lorry work planning with consideration of its design modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 498-509. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-498-509>

© Trofimov B.S., Trofimova I.S., 2021



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В статье представлен научно-методический подход к планированию работы грузовых автомобилей с учетом внесения изменений в их конструкцию, который включает в себя:

– усовершенствованные методы оптимизации планирования работы грузового автотранспортного предприятия с учетом взаимосвязи деятельности по перевозке грузов, техническому обслуживанию и текущему ремонту;

– алгоритм методики для получения свидетельства в ГИБДД после внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля, позволяющий учитывать установленные требования к эксплуатации автомобиля;

– математическую модель планирования работы автотранспортного предприятия с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля;

– методику для планирования работы автотранспортного предприятия с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля.

Выполнена практическая реализация и апробация разработанной методики на примере перевозок грузов автомобилем с изменениями в конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля предполагает технические процедуры, которые модернизируют, существенно изменяют его эксплуатационные характеристики, вследствие чего может быть изменено даже целевое назначение автомобиля. Планирование выполнения технических воздействий для безопасности перевозок грузов и дорожного движения, затрат на обеспечение действующих требований по внесению изменений в конструкцию автомобилей и его эксплуатацию является необходимым элементом деятельности автотранспортного предприятия (АТП) в современных условиях. В планировании необходимо учитывать объем перевозок грузов, который будет затребован заказчиками и установлен в договоре для выполнения автомобилями с изменениями в конструкции.

В России внесение изменений в конструкцию автомобилей должно отвечать установленным требованиям, проводиться в соответствии с правилами безопасности и не представлять угрозы для жизни водителя и пешеходов. Такой автомобиль должен быть сертифицирован экспертами с предоставлением разрешающих документов, которые потребуются в автоинспекции для регистрации.

Процедура сертификации и регистрации регламентирована законодательно. Внесение изменений в конструкцию грузового автомобиля должно быть выполнено в соответствии с ФЗ № 196 от 10.12.1995 г. «О безопасности дорожного движения». Последние изменения в данный документ были внесены летом 2021 г. О переоборудовании автотранспорта говорится в 15-й статье закона (п. 4, дополненный в соответствии с ФЗ № 313 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ...» от 30.12.2008 г.). Согласно документу надзорная функция, которая предусматривает контроль и регистрационные действия, возложена на Министерство внутренних дел (региональные подразделения) в соответствии с Постановлением Правительства № 716 от 19.08.2013 г. «О федеральном госнадзоре в области безопасности дорожного движения». Сертификация и выдача соответствующих документов проводятся организациями, имеющими разрешение государственных органов на проведение экспертных проверок в области изменения конструкций автомобилей и соответствия данных изменений правилам безопасной эксплуатации грузовых автомобилей. Регистрируют автомобили с внесенными изменениями в подразделениях ГИБДД.

Применение нового научно-методического подхода, направленного на планирование работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля, обеспечит выполнение договоров на перевозку грузов и получение прибыли.

Изучение исследований научных и практических работников, которые выполнены в России и за рубежом, показало разнообразие научных подходов к эксплуатации автомобилей с учетом внесения изменений в их конструкцию и к планированию их работы.

В работе [1] эффективность эксплуатации автомобиля определялась повышением скорости движения и проходимость при перевозках в сложных дорожных условиях, которая достигается за счет совершенствования его конструкции.

В работе [2] предлагается внедрение бортовой системы дистанционного диагностирования, которая позволит в режиме реального времени отслеживать техническое состояние автомобиля и более точно управлять процессом перевозок.

Н.Р. Гулиев и др. [3] предложили способ повышения ресурса базовых деталей для снижения количества отказов пневматической тормозной системы автомобиля за счет раз-

работки новой конструкции компрессионных поршневых колец, которая отличается высокими эксплуатационными характеристиками, низкой себестоимостью.

В работе [4] разработан коэффициент остаточного ресурса, который представляет собой отношение расчетной наработки до отказа эксплуатируемого самосвала к гарантированной заводом-изготовителем наработки как критерий долговечности автомобиля.

Повышение ресурса базовых деталей при влиянии природных условий на эффективную эксплуатацию грузовых автомобилей предложено обеспечивать за счёт установки электрического ленточного подогревателя [5].

В результате изучения научных исследований было установлено, что в качестве критерия эффективности при планировании работы автомобилей использовались показатели безопасности перевозок грузов. О. Адилов, У. Нуруллаев, С. Турушев [6] для оценки приспособленности конструкции подвижного состава по эксплуатационным свойствам применяли критические параметры движения и положения автомобиля, требуемые значения которых обеспечивают безопасность перевозок грузов. Разработанная модель на основе нейросети, способ выбора опытов space-filling для оптимизации конструкции при сохранении исходных параметров жесткости и энергоемкости позволила авторам работы [7] обеспечить показатели безопасности перевозок грузов.

Было предложено рассчитывать экономический эффект от изменения конструкций грузовых вагонов с учетом эффекта для экономики, текущих расходов от перевозок и уменьшение суммы приведенных затрат на величину ликвидационной стоимости подвижного состава [8].

Применительно к планированию работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля были выполнены исследования по кузовам этих автомобилей.

S. Satish, S.J. Alexis, A. Bhuvendran [9] предложили внесение изменений в конструкцию кузова грузового автомобиля для увеличения его грузоподъемности, что требуется для повышения эффективности работы автотранспортных предприятий в Индии.

Z.W. Yao, Q. Huang, Z. Ji, X.F. Li, Q. Bi [10] делают вывод о влиянии конструкции кузова самосвала на эффективность перевозок. В связи с этим авторы предложили новый метод прогнозирования работы автомобилей на основе нейронной сети с обратным распростра-

нением, позволяющий исследовать текущее состояние работы автомобилей.

X. Xi, L. Changchun, W. Yuan, L.L. Hay [11] исследовали проблему планирования, учитывающую время прибытия грузовых автомобилей в морской порт, позволяющую минимизировать общие затраты на перевозку.

Для планирования перевозок скоропортящихся продуктов была установлена зависимость количества энергии, потребляемой на охлаждение кузова рефрижератора, от внешних условий и скорости автомобиля для анализа планов работы автомобилей при перевозке грузов [12]. Определены соотношения между оптимальной длиной камеры смешения и различными режимами её работы для совершенствования конструкций кузова рефрижератора грузовых автомобилей [13].

J. Jae, K. Jiwoo, H. Sang, J. Lee [14] предложили оценивать изменения в конструкции грузового автомобиля по величине экономии топлива и снижению загрязнения окружающей среды на примере разработанного обтекателя крыши кабины для снижения лобового сопротивления, оказываемого на переднюю часть кузова.

В работах [15, 16] установлено, что эффективность использования грузовых автомобилей зависит от свойств груза, которые могут меняться в течение всего срока пребывания его на складе. Это необходимо учитывать для экономии затрат на перевозку путем применения грузовых автомобилей разной грузоподъемности с самосвальным или бортовым кузовом по сезонам года [15], для влияния стохастических задержек обслуживания лесных дорог на лесозаготовке при выполнении условий договоров на перевозку [16].

Ряд исследований посвящен взаимосвязи работы автомобилей и машин, выполняющих производственные работы.

Авторы [17] выполнили оптимизацию планирования работы автомобилей с учетом подбора их конструкции и параметров кранов при работе во дворах городских улиц для повышения производительности контейнерного терминала. Предложенная имитационная модель применялась для моделирования загрузки и перевозки контейнеров, оценки альтернативных вариантов планирования.

В работе [18] была выполнена оптимизация планирования при совместной работе большегрузных автомобилей в портах, расположенных в черте города.

А.Н. Новиков, И.А. Новиков, Н.А. Загородний, А.С. Семькина [19] исследовали систему

«карьер-склад/обогадательная фабрика-производство», S.R. Pattersona, E. Kozana, P. Nylandb [20] для повышения энергоэффективности и снижения затрат при планировании перевозок грузов для практики работы действующей шахты в Юго-Восточном Квинсленде использовали анализ чувствительности и метод сценариев.

Исследование работы карьерных самосвалов [21, 22] и большегрузных грузовиков [23] позволило разработать решения по их переоборудованию для использования альтернативных видов топлив, в качестве критерия эффективности при планировании работы самосвалов были использованы затраты на топливо и количество выбросов вредных веществ.

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых, практических работников требуют совершенствования, так как имеющиеся методы не учитывают практику работы АТП, которая требует соблюдения следующих условий:

- соответствие контролируемых параметров автомобиля требуемым значениям при внесении изменения в конструкцию;
- соответствие планового объема технических воздействий требуемому объему в зависимости от условий эксплуатации автомобилей;
- соответствие объема перевозок в договоре плановой выработки автомобилей на перевозку различных видов грузов.

Можно утверждать, что тема настоящего исследования является актуальной.

Целью исследования является разработка нового научно-методического подхода для планирования работы грузовых автомобилей с учетом внесения изменений в их конструкцию.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи по разработке:

- алгоритма методики для получения свидетельства в ГИБДД после внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля;
- математической модели планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля;
- методики для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля.

Для реализации цели необходимо выполнить практическое применение разработанной методики.

Научная значимость настоящего исследования состоит в разработке теоретическо-

го подхода и методического инструментария для планирования работы АТП при перевозке грузов автомобилями с учетом внесения изменений в конструкцию при соответствии контролируемых параметров действующим законодательным требованиям. Выполняются условия по обеспечению технически исправного состояния автомобиля, выполнению условий договоров и получению прибыли АТП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для учета соответствия изменения в конструкцию автомобиля существующим требованиям, которое должно быть отражено в новом научно-методическом подходе, разработан алгоритм методики для получения свидетельства в ГИБДД после внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля, представленный на рисунке 1.

Разработанный алгоритм отражает процедуру подачи заявления в специальную уполномоченную организацию (испытательную лабораторию), которая входит в Единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) Таможенного союза (всего таких лабораторий в РФ 64). Законодательством никак не ограничены возможности по внесению изменений в конструкцию автомобиля.

Предварительная экспертиза проводится в испытательной лаборатории и считается пройденной, если существуют возможности внесения изменений в конструкцию автомобиля по контролируемым параметрам (колесная база, модель КПП, ширина лонжеронов и т. д.).

При соответствии параметров конструкции контролируемым параметрам владелец автомобиля может получить свидетельство в ГИБДД (рисунок 1, 7). Это условие необходимо использовать в качестве ограничений при математическом моделировании планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля.

В работах [24, 25] было установлено, что функционирование АТП направлено на получение прибыли, это отражено в настоящем исследовании (формула (1)). В математической модели данный критерий позволит планировать работу АТП и обосновать экономические затраты на внесение изменений в конструкцию грузового автомобиля для планирования выполнения условий договоров, так как учитываются затраты на переоборудование и результат от перевозок грузов этим автомобилем (формулы (2, 3)).

Внесение изменений в конструкцию кузова грузового автомобиля позволит ему перево-



Рисунок 1 – Алгоритм методики для получения свидетельства в ГИБДД после внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля

Figure 1 – Methodology for obtaining a certificate from the traffic police after lorry modification

зить грузы разного свойства. Это предусмотрено в математической модели при расчете выработки для каждого автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке конкретных видов грузов по конкретному договору (формулы (2), (3)). В исследованиях [26] установлено, что идентификация видов грузов обеспечивает соблюдение нормативно-закондательных требований. Математическая модель учитывает, что в работе АТП используются автомобили, на которые получены свидетельства о регистрации в ГИБДД по ре-

зультатам внесения изменений в конструкцию (формула (4)).

Математическая модель позволяет учитывать необходимость выполнения плановых технических обслуживаний автомобилей и потребность в перевозке определенного объема груза по каждому договору (формулы (5), (6)).

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^I (R_i - 3_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$R_i = \left(\sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^J (Q_{i,x,j} \cdot n_{TOi,x,j}) \right) \cdot D_i \cdot C_i; i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где Э – эффект от работы АТП, руб.; R_i – результат от выполнения условий i -го договора, руб.; Z_i – затраты на выполнение условий i -го договора, руб.; x – номер автомобиля с изменениями в конструкции, который числится в АТП; X – количество автомобилей с изменениями в конструкции; j – вид груза, который может быть перевезен автомобилем с изменениями в конструкции; J – количество видов груза, которые могут быть перевезены автомобилем с изменениями в конструкции; $Q_{i,x,j}$ – выработка за смену x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, т; $n_{TOi,x,j}$ – показатель применения по выполнению технических обслуживаний x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, $n_{i,x,j} = 0,1$, $n_{i,x,j} = \text{int}(n_{i,x,j})$; D_i – период выполнения i -го договора, смены; $D_i = \text{int}(D_i)$; C_i – тариф на перевозку груза по i -му договору, руб./т.

$$Z_i = \sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^J ((W_{i,x,j} \cdot n_{Pi,x,j}) + U_{i,x,j} + F_{i,x,j} + G_{i,x,j} + A_{i,x,j} + H_{i,x,j}); i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

где $W_{i,x,j}$ – затраты на изменения в конструкции x -го автомобиля для перевозки j -го вида груза по i -му договору, руб.; $n_{Pi,x,j}$ – булева переменная возможности применения x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору; $n_{Pi,x,j} = 0,1$, $n_{Pi,x,j} = \text{int}(n_{Pi,x,j})$; $U_{i,x,j}$ – затраты на топливо x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, руб.; $F_{i,x,j}$ – затраты на оплату труда с отчислениями для водителя x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, руб.; $G_{i,x,j}$ – затраты на выполнение ТО и ТР x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, руб.; $A_{i,x,j}$ – амортизационные отчисления для x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, руб.; $H_{i,x,j}$ – накладные расходы x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору руб.

$$n_{Px} = \begin{cases} 1, \text{ если } P_{\min} \leq P_x \leq P_{\max}; \\ 0 \text{ в противном случае;} \end{cases} x = \overline{1, X}, \quad (4)$$

где P_x – контролируемый параметр конструкции после внесения изменения для x -го автомобиля, применяемые единицы измерения для каждого конкретного параметра; P_{\min}, P_{\max} – соответственно максимальное и минимальное значение контролируемых параметров, применяемые единицы измерения для каждого конкретного параметра.

$$\sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^J (Q_{i,x,j} \cdot n_{TOi,x,j}) \cdot D_i \geq Q_{in}; i = \overline{1, I}, \quad (5)$$

где Q_{in} – объем перевозок груза, который должен быть выполнен по i -му договору т.

$$n_{TOi,x,j} = \begin{cases} 1, \text{ если } \begin{cases} (N_{TO-1x} \cdot u_{TO-1x}) \geq y_{TO-1i,x,j}; \\ (N_{TO-2x} \cdot u_{TO-2,TPx}) \geq y_{TO-2,TPi,x,j}; \end{cases} i = \overline{1, I}; x = \overline{1, X}; j = \overline{1, J}; \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (6)$$

где N_{TO-1x}, N_{TO-2x} – количество воздействий для x -го автомобиля с изменениями в конструкции соответственно по ТО-1, ТО-2, ед.; $N_{TO-1x} = \text{int}(N_{TO-1x}), N_{TO-2x} = \text{int}(N_{TO-2x})$; $u_{TO-1x}, u_{TO-2,TPx}$ – трудоемкость одного воздействия для x -го автомобиля с изменениями в конструкции соответственно по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч; $y_{TO-1i,x,j}, y_{TO-2,TPi,x,j}$ – необходимая трудоемкость для x -го автомобиля с изменениями в конструкции при перевозке j -го вида груза по i -му договору, соответственно по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч.

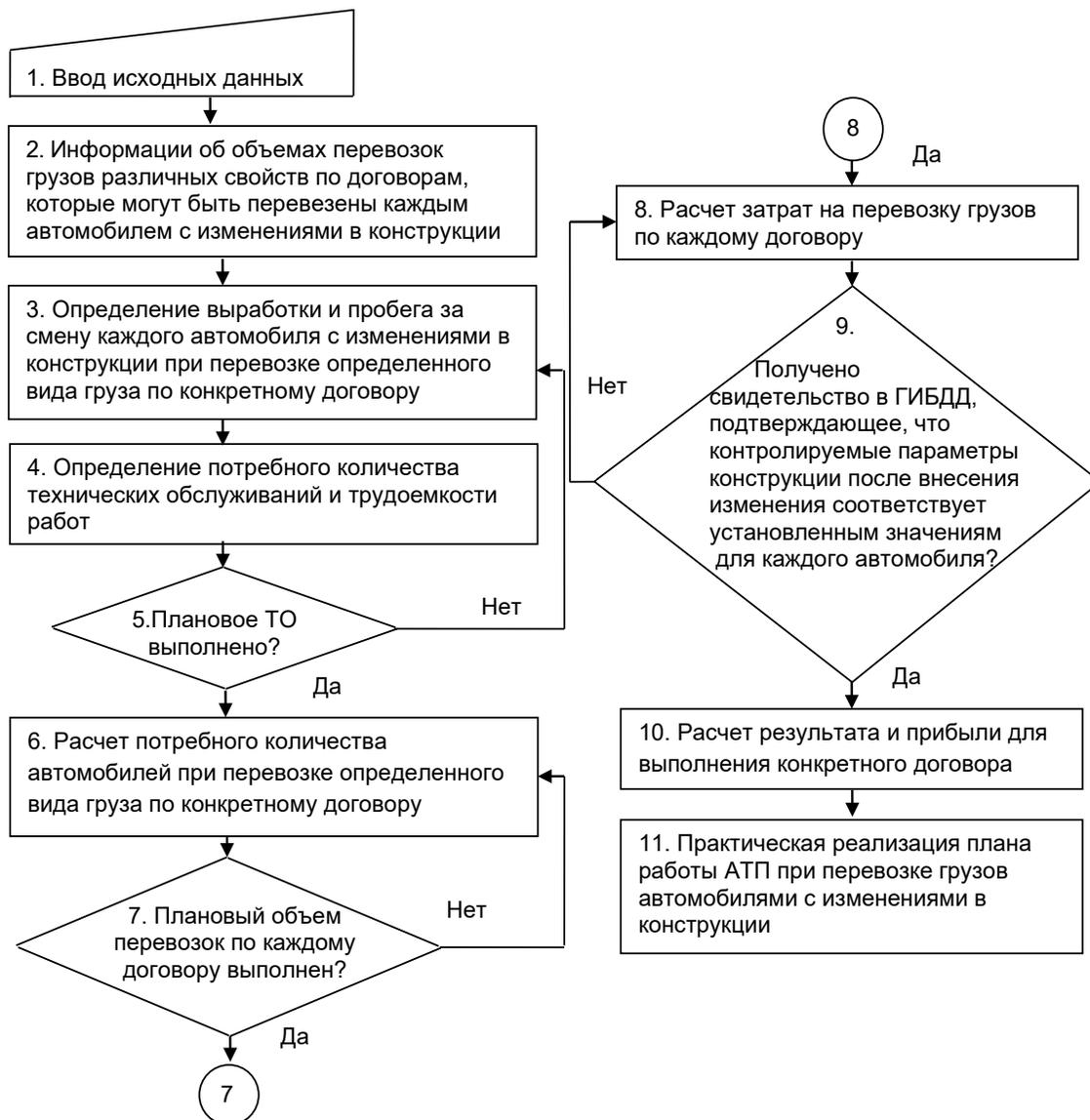


Рисунок 2 – Алгоритм методики для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля

Figure 2 – Methodology algorithm for operation planning of a motor transport enterprise, taking into account modifications to a lorry design

Для реализации математической модели разработана методика для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля (рисунок 2).

В качестве исходных данных в методике выступает следующая информация:

- марка автомобиля, тип кузова;
- технические характеристики автомобилей (колесная база, тип двигателя, параметры коробки передач и т. д.);
- грузоподъемность, время погрузки-выгрузки для разного вида груза и погрузочных механизмов, средняя техническая скорость,

нулевой пробег, груженный пробег, периодичность проведения технических обслуживаний и трудоемкости работ;

- объем перевозок по конкретному виду груза, указанный в договоре;
- стоимость литра топлива и смазочных материалов, необходимых для расчета затрат;
- контролируемые параметры конструкции автомобиля после внесения изменений в конструкцию. Например, при изменении типа кузова, на шасси транспортного средства стандартных самосвальных и бортовых кузовов, цистерн, кузовов-фургонов контролируемые

параметрами будут являться: максимальная масса и ее распределение по осям и бортам, а также изменение координат центра масс, габаритная ширина кузова, место расположения и установка задних внешних световых приборов, приборов освещения и т. д.

На основании данных об объемах перевозок грузов различных свойств по договорам производится расчет выработки и пробега за смену каждого автомобиля. Определение потребного количества технических обслуживаний и трудоемкости работ для каждого автомобиля с изменениями в конструкции выполняется по плановым пробегам. После планирования технических обслуживаний назначается необходимое количество автомобилей на перевозку определенного вида груза по конкретному договору.

На основании полученных данных выполняется расчет затрат и прибыли по конкретному договору каждого автомобиля с изменениями в конструкции.

Использование в настоящем исследовании работ отечественных и зарубежных ученых по эксплуатации автомобилей с внесением изменений в его конструкцию, основных положений Федеральных законов в части разрешений на эксплуатацию автомобилей, методов оптимизации планирования работы грузового автотранспортного предприятия, применение системного анализа и логического анализа позволило разработать научно-методический подход для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, которые поставлены в работе, выполнены в полном объеме. Разработаны математическая модель и методика, позволяющие планировать работу грузовых автомобилей, параметры которых после изменения в конструкции соответствуют требуемым значениям, что учитывается при расчете затрат и прибыли на перевозку различных видов грузов по договорам в деятельности АТП.

Научная новизна исследования представлена в виде:

- математической модели планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля;
- алгоритма методики для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля.

Результаты работы могут быть использованы в практике работы АТП для планирования показателей перевозок грузов и выполнения

ТО и ТР автомобилей с учетом внесения изменений в их конструкцию.

В условиях ограниченных ресурсов АТП, при отсутствии большого и разнообразного парка автомобилей одним из способов выполнения договоров будет внесение изменений в конструкцию автомобилей с целью расширения возможностей для перевозок грузов, требующих применения самосвальных кузовов в автомобилях малой грузоподъемностью.

Методика планирования работы грузовых автомобилей с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля получила практическое применение на АТП г. Омска, которое оказывает услуги по перевозке лесной продукции в Омской области. Техническая и производственная база предприятия состоит из зоны ТО и ТР, складских помещений, зон технических и санитарных служб. Автомобильный парк предприятия включает в себя бортовые грузовые автомобили КамАЗ-53212, КамАЗ-43108. Был заключен договор на перевозку грузов, разгрузка которых выполняется навалом, поэтому возникла необходимость для внесения изменений в конструкцию автомобиля КамАЗ-53212 с целью эксплуатации в качестве самосвала.

Периодичность и количество технических обслуживаний автомобиля КамАЗ-53212 до внесения изменений в конструкцию и после не изменятся, но за счет новых элементов в конструкции увеличится трудоемкость выполнения технических воздействий. Изменения, вносимые в конструкцию автомобиля КамАЗ-53212, выполнены за счет гидрофикации, остальные элементы автомобиля КамАЗ-53212 не затрагиваются.

Затраты на внесения изменений в конструкцию включали в себя затраты на приобретение сварочного аппарата, материалов и комплектов (гидробака, креплений для гидрофикации и др.), разработку конструкторской документации и составили 83 957 руб. Получено свидетельство в ГИБДД, подтверждающее вносимые в конструкцию автомобиля КамАЗ-53212 изменения. Общие затраты на выполнение условий договора одним автомобилем составили 199 400 руб., а величина прибыли – 450 00,8 руб. на один автомобиль.

Основные выводы по результатам исследований:

1. Изучение ФЗ № 196 от 10.12.1995 г. (15-я статья), Постановления Правительства № 716 от 19.08.2013 г. «О федеральном госнадзоре в области безопасности дорожного движения» позволило разработать ограничения при математическом моделировании планирования ра-

боты АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля для получения разрешения.

2. Обзор научных работ отечественных и зарубежных ученых по эксплуатации автомобилей с внесением изменений в его конструкцию позволил выявить, что в ранее выполненных исследованиях внимание уделялось эффективности работы отдельного автомобиля без учета эксплуатации его в условиях деятельности АТП, которая направлена на выполнение условий договоров и получение прибыли при перевозке различных видов грузов. Отсутствие на практике теоретико-методического подхода к планированию работы грузового автомобиля с учетом изменения в его конструкции вызвало необходимость проведения дополнительных исследований для разработки актуальной методики.

3. Разработана математическая модель планирования работы АТП, позволяющая учитывать:

– внесение изменений в конструкцию грузового автомобиля путем проверки соответствия контролируемых параметров параметрам, установленным действующим законодательством;

– выполнение условий по обеспечению технически исправного состояния автомобиля;

– выполнение условий договоров;

– получение прибыли АТП.

4. Разработана методика для планирования работы АТП с учетом внесения изменений в конструкцию грузового автомобиля, определяющая этапы для практики расчета показателей по перевозкам различных видов грузов, выполнению плановых технических обслуживаний, затратам и прибыли за период выполнения условий договоров.

5. Применение разработанной методики в практике работы АТП г. Омска подтверждает научную и практическую значимость выполненных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щитов С.В., Тихончук П.В., Кривуца З.Ф. [и др.]. Пути повышения поперечной устойчивости многоосного транспортного средства // Дальневосточный аграрный вестник. 2018. № 4(48). С. 262–271. DOI: 10.24411/1999-6837-2018-14113.

2. Инсафуддинов С.З. О разработке методики непрерывного диагностирования технического состояния автотракторной и сельскохозяйственной техники с использованием цифровых технологий // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. № 3(47). С. 43–49. DOI 10.31563/1684-7628-2018-47-3-43-49.

3. Гулиев Н.Р., Никитин Д.А., Никитина Л.В., Чекмарев В.В., Кондаков К.С. Повышение надежно-

сти пневматической тормозной системы автомобиля с компрессорным нагнетанием воздуха // Аграрный научный журнал. 2020. № 6. С. 81–86. DOI: 10.28983/asj.y2020i6pp81-85.

4. Паначев И.А., Кузнецов И.В. Анализ ресурса несущих элементов задних мостов карьерных самосвалов в процессе их эксплуатации при различных значениях руководящего уклона трассы // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2019. № 3(40). С. 13–20. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-2>.

5. Кузнецов Е.Е., Худовец В.И., Дремина С.Л. [и др.] Экспериментальные исследования гидравлического механизма подъема кузова самосвального автомобиля с электрическим ленточным подогревателем // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12–2(78). С. 58–63. DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.048.

6. Адилев О., Нуруллаев У., Турушев С. Методика оценки приспособленности конструкции подвижного состава к условиям эксплуатации. Academic research in educational sciences. V. 2. I. 5. 2021. С. 650–658. DOI: 10.24411/2181-1385-2021-00939.

7. Гончаров Р.Б. Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 4(709). С. 28–40. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-28-40.

8. Кунгурцев В.В., Кудряшова Е.Ю. Оценка эффективности использования специальных грузовых вагонов усовершенствованных конструкций // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 5(59). Часть 3. С. 69–71. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.59.081>.

9. Satish S., Alexis S.J., Bhuvendran A., Satisha S., John S., Arun A., Mohanraj B., Shanmugamb S., Baskar V., Shaisundaram S. Design and analysis of mild steel mini truck body for increasing the payload capacity. Materialstoday: proceedings. 2021. V. 37. P. 2. P. 1274–1280. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.459.

10. Yao Z.W., Huang Q., Ji Z., Li X.F., Bi Q. Deep learning-based prediction of piled-up status and payload distribution of bulk material. Automation in Construction. 2021. V.121. 103424 DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103424

11. Xi X., Changchun L., Yuan W., Hayb L.L. Two-stage conflict robust optimization models for cross-dock truck scheduling problem under uncertainty. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. T. 144. 102123. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102123

12. Artusoa P., Rossettib A., Minettob S., Marinettib S., Moroa L., Cola D. D. Dynamic modeling and thermal performance analysis of a refrigerated truck body during operation International. Journal of Refrigeration. 2019. V. 99. P. 288–299. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.12.014

13. Wen H., Yan J. Effect of mixing chamber length on ejector performance with fixed/ varied area ratio under three operating conditions in refrigerated trucks. Applied Thermal Engineering. 2021. T. 197. 117379. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117379.

14. Jae J., Jiwoo K., Sang H., Lee J. Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. V. 131–132. P. 868-879. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.08.010.

15. Sfeir T. de A., Junior J., Ruiz A., Bel L. L. Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. *Omega*. 2021. V. 98. 102135. DOI: 10.1016/j.omega.2019.102135

16. Va. de S. Gomes, aC. Augusto, U. Monti, C. Souza, J. Silva, aL. R. Gomide Operational harvest planning under forest road maintenance uncertainty. *Forest Policy and Economics*. 2021. T. 131. 102562. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102562.

17. H.-P. Hsua, H.-H. Taib, C.-N. Wangc, C.-C. Chou Scheduling of collaborative operations of yard cranes and yard trucks for export containers using hybrid approaches. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. V. 48. 101292. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101292

18. Schulte F., Lalla-Ruiza E., González-Ramírez R. G., Vořa S. Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2017. V. 105. P. 195-212. DOI: 10.1016/j.tre.2017.03.008

19. Новиков А.Н., Новиков И.А., Загородний Н.А., Семькина А.С. Разработка научно-методических подходов для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 6(76). С. 690–703. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-690-703.

20. Patterson S.R., Kozana E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks *European Journal of Operational Research*. 2017. V. 262, I. 2, 16. P. 759-770. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.081.

21. Feng Y., Dong Z. Optimal control of natural gas compression engine hybrid electric mining trucks for balanced fuel efficiency and overall emission improvement *Energy*. 2019. V. 189. 116276. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116276

22. Yanga W., Liangb J., Yanga J., Walkerc P. D., Zhangc N. Corresponding drivability control and energy control strategy in uninterrupted multi-speed mining trucks. *Journal of the Franklin Institute*. 2021. V. 358. I. 2. P. 1214-1239. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2020.11.014

23. Anderhofstadt B., Spinler S. Preferences for autonomous and alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. V. 79. 102232. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102232.

24. Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 4. С. 243–252. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-243-252.

25. Трофимова Л.С. Методика текущего планирования работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе // Вестник СибАДИ. 2020. 17(2). С. 234–247. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247.

26. Смирнова О.Ю. Вопросы идентификации грузов при перевозке автомобильным транспортом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 125–133. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-2-125.

REFERENCES

1. Shchitov S. V., Tihonchuk P. V., Krivuca Z. F. [i dr.]. Puti povysheniya poperechnoj ustojchivosti mnogoosnogo transportnogo sredstva [Ways to increase the lateral stability of a multi-axle vehicle]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. 2018. 4(48): 262-271. DOI: 10.24411/1999-6837-2018-14113. (In Russian)

2. Insafuddinov, S. Z. O razrabotke metodiki nepreryvnogo diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtotraktornoj i sel'skohozyajstvennoj tekhniki s ispol'zovaniem cifrovych tekhnologij. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. 3(47): 43-49. DOI 10.31563/1684-7628-2018-47-3-43-49.

3. Guliev N. R., Nikitin D. A., Nikitina L. V., Chkernarev V. V., Kondakov K. S. Povyschenie nadezhnosti pnevmaticheskoy tormoznoj sistemy avtomobilya s kompressornym nagnetaniem vozduha. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2020. 6: 81-86. DOI: 10.28983/asj.y2020i6pp81-85.

4. Panachev I.A., Kuznecov I.V. Analiz resursa nesushchih elementov zadnih mostov kar'ernyh samosvalov v processe ih ekspluatatsii pri razlichnyh znacheniyah rukovodyashchego uklona trassy. *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU*. 2019. 3(40): 13-20. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-2>

5. Kuznecov E. E., Hudovec V. I., Dremina S. L. [i dr.]. Eksperimental'nye issledovaniya gidravlicheskogo mekhanizma pod"yoma kuzova samosval'nogo avtomobilya s elektricheskim lentochnym podogrevatelem. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2018. 12-2(78): 58-63. DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.048.

6. Adilov O., Nurullaev U., Turushev S. D. Metodika ocenki prispособlennosti konstrukcii podvizhnogo sostava k usloviyam ekspluatatsii. *Academic research in educational sciences*. 2. 5. 2021: 650-658. DOI: 10.24411/2181-1385-2021-00939.

7. Goncharov R. B. Issledovanie effektivnosti algoritmov parametriceskoj optimizatsii primenitel'no k processam udarnogo vozdejstviya na primere bampera i kabiny avtomobilya. *Izvestiya vysshih uczebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2019. 4(709): 28-40. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-28-40.

8. Kungurcev V.V., Kudryashova E.YU. Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya special'nyh gruzovyh vagonov usovershenstvovannyh konstrukcij. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2017 3 5(59): 69-71. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.59.081>.

9. Satish S., Alexis S.J., Bhuvendran A., Satisha S., John S., Arun A., Mohanraj B., Shanmugamb S., Baskar V., Shaisundaramc S. Design and analysis of mild steel mini truck body for increasing the payload capacity. *Materialstoday: proceedings*. 2021. 37. 2: 1274-1280. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.459.

10. Yao Z.W., Huang Q., Ji Z., Li X.F., Bi Q. Deep learning-based prediction of piled-up status and payload distribution of bulk material. *Automation in Construction*. 2021. 121: 103424 DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103424

11. Xi X., Changchun L., Yuan W., Hayb L.L. Two-stage conflict robust optimization models for cross-dock truck scheduling problem under uncertainty Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. 144. 102123. DOI:10.1016/j.tre.2020.102123
12. Artusoa P., Rossettib A., Minettob S., Marinettib S., Moroa L., Cola D. D. Dynamic modeling and thermal performance analysis of a refrigerated truck body during operation International. Journal of Refrigeration. 2019. V. 99. P. 288-299. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.12.014
13. Wen H., Yan J. Effect of mixing chamber length on ejector performance with fixed/varied area ratio under three operating conditions in refrigerated trucks. Applied Thermal Engineering. 2021. T. 197. 117379. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2021.117379.
14. Jae J., Jiwoo K., Sang H., Lee J. Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability. International Journal of Mechanical Sciences. 2017. 131–132: 868-879. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.08.010.
15. Sfeir T. de A., Junior J., Ruiz A., Bel L. L. Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. Omega. 2021. 98. 102135. DOI: 10.1016/j.omega.2019.102135
16. Va. de S. Gomes, aC. Augusto, U. Monti, C. Souza, J.Silva, aL. R. Gomide Operational harvest planning under forest road maintenance uncertainty. Forest Policy and Economics. 2021. 131. 102562. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102562.
17. H.-P. Hsua, H.-H. Taib, C.-N. Wangc, C.-C. Chou Scheduling of collaborative operations of yard cranes and yard trucks for export containers using hybrid approaches. Advanced Engineering Informatics. 2021. 48. 101292. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101292
18. Schultea F., Lalla-Ruiza E., González-Ramírezb R. G., Vořsa S. Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2017. V. 105. P. 195-212. DOI: 10.1016/j.tre.2017.03.008
- Novikov A. N., Novikov I. A., Zagorodnij N. A., Semykina A. S. Razrabotka nauchno-metodicheskikh podhodov dlya povysheniya effektivnosti ekspluatatsii kar'ernogo transporta. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020. 17 6(76): 690-703. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6-690-703.
19. Pattersona S.R., Kozana E., Hylandb P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks European Journal of Operational Research. 2017. V. 262, I. 2, 16: 759-770. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.081.
20. Feng Y., Dong Z. Optimal control of natural gas compression engine hybrid electric mining trucks for balanced fuel efficiency and overall emission improvement Energy. 2019. 189. 116276. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116276
21. Yanga W., Liangb J., Yanga J., Walkerc P. D., Zhangc N. Corresponding drivability control and energy control strategy in uninterrupted multi-speed mining trucks. Journal of the Franklin Institute. 2021. 358 I 2: 1214-1239. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2020.11.014
22. Anderhofstadt B., Spinler S. Preferences for autonomous and alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020. 79. 102232. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102232.
23. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Matematicheskaya model' funkcionirovaniya avtotransportnogo predpriyatiya pri perezovke gruzov v mezhdugorodnom soobshchenii dlya tekushchego planirovaniya. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. 22(4): 243-252. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-243-252 (In Russian)
- Trofimova, L.C. Metodika tekushchego planirovaniya raboty avtotransportnogo predpriyatiya pri perezovke gruzov v gorode. Nauchnyj recenziruemyj zhurnal The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020. 17(2): 234-247. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247 (In Russian)
24. Smirnova, O. YU. Voprosy identifikatsii gruzov pri perezovke avtomobil'nym transportom. Intellekt. Innovatsii. Investitsii. 2020. 2: 125-133. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-2-125 (In Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трофимов Б.С. Вклад в общую работу составил 50%, что является ½ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, обсуждения и заключения.

Трофимова Л.С. Вклад в общую работу составил 50%, что является ½ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, обсуждения и заключения.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Boris S. Trofimov, the contribution to the overall paper was 50%, which is ½ share in the development of the following sections of the research paper: abstract, introduction, materials and methods, discussion and conclusion.

Liudmila S. Trofimova, the contribution to the overall paper was 50%, which is ½ share in the development of the following sections of the research paper: abstract, introduction, materials and methods, discussion and conclusion.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимов Борис Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей».

Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris S. Trofimov, Cand. of Sci., Associate Professor of the Vehicles Operation and Maintenance Department.

Liudmila S. Trofimova, Dr. of Sci., Professor of the Transport Organisation and Management Department.

Научная статья

УДК 331.453

УДК 629.341

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-510-523>

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОТОПЛЕНИЯ В ПАССАЖИРСКОМ САЛОНЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Д.С. Алешков, М.В. Банкет, М.В. Суковин

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

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

mikhail_banket@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1901-8150>

sukovin_8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3151-4341>

АННОТАЦИЯ

Введение. Отличительной особенностью условий труда на арктических территориях является продолжительный период воздействия низких температур. Пассажирские перевозки автомобильным транспортом становятся одним из ключевых аспектов обеспечения непрерывности производственного процесса. Задачу доставки работающих к месту производства работ, перемещения их между рабочими зонами в течение рабочей смены решают применением колесных транспортных средств различных категорий. Одним из наиболее широко распространенных типов колесных транспортных средств, используемых для транспортирования работающих, являются колесные транспортные средства категории М3 вместимостью не более 22 пассажиров. Обеспечение теплового комфорта пассажиров транспортных средств представляется актуальным, т.к. обеспечение биофизической совместимости минимизирует риски получения работающими холодовых травм и сохраняет высокий уровень работоспособности.

Материалы и методы. Представлены результаты анализа российских и зарубежных исследований в направлении обеспечения теплового комфорта и биофизической совместимости в замкнутых объемах. Приведены результаты компьютерного моделирования динамики параметров микроклимата в пассажирском салоне колесного транспортного средства категории М3 вместимостью не более 22 пассажиров.

Результаты. В работе представлены результаты теоретических исследований, параметров микроклимата в пассажирском салоне транспортных средств с учетом дыхания пассажиров и изменения газового состава выдыхаемого воздуха. Были проведены теоретические исследования работы системы отопления пассажирского салона с учетом уточненной модели дыхания пассажиров. Получены распределения параметров микроклимата в сечении пассажирского салона при использовании системы отопления с одним отопителем, произведена оценка влияния дыхания пассажиров на параметры микроклимата в пассажирском салоне.

Обсуждение и заключение. На основе численного решения системы уравнений теплообмена сформулированы направления дальнейших исследований и рекомендации, позволяющие обеспечить тепловой комфорт в пассажирском салоне колесного транспортного средства в условиях пониженных температур. Материалы работы могут представлять интерес для специалистов, занимающихся проектированием и эргономикой колесных транспортных средств, охраной труда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система отопления, параметры микроклимата, тепловой комфорт, внешнее дыхание, пассажирский салон, транспортное средство

Статья поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Алешков Д.С., Банкет М.В., Суковин М.В. Разработка имитационной модели процесса отопления в пассажирском салоне транспортного средства в условиях низких температур // *Вестник СибАДИ.* 2021. Т.18, № 5(81). С. 510-523. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-510-523>

© Алешков Д.С., Банкет М.В., Суковин М.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-510-523>

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE HEATING PROCESS IN THE PASSENGER CABIN OF A VEHICLE UNDER LOW TEMPERATURE CONDITIONS

Denis A. Aleshkov, Mikhail V. Banket, Mikhail V. Sukovin

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

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

mikhail_banket@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1901-8150>

sukovin_8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3151-4341>

ABSTRACT

Introduction. A distinctive feature of working conditions in the Arctic territories is the long period of exposure to low temperatures. Passenger transportation by road is becoming one of the key aspects of ensuring the continuity of the production process. The task of delivering workers to the place of work, moving them between work zones during a work shift is solved by using wheeled vehicles of various categories. One of the most widespread types of wheeled vehicles used to transport workers is the M3 category wheeled vehicles with a capacity of no more than 22 passengers. Ensuring the thermal comfort of vehicle passengers seems to be relevant, since ensuring biophysical compatibility minimizes the risks of cold injury by workers and maintains a high level of performance.

Materials and methods. The results of the analysis of the Russian and foreign studies in the direction of ensuring thermal comfort and ensuring biophysical compatibility in confined spaces are presented. The results of computer modelling of the dynamics of microclimate parameters in the passenger cabin of a wheeled vehicle of M3 category with a capacity of no more than 22 passengers are presented.

Results. The paper presents the results of theoretical studies, microclimate parameters in the passenger compartment of vehicles, taking into account the breathing of passengers and changes in the gas composition of exhaled air. Theoretical studies of the operation of the heating system of the passenger compartment were carried out, taking into account the refined breathing model of passengers. Distributions of microclimate parameters in the section of the passenger compartment were obtained when using a heating system with one heater; the impact of passengers' breathing on the parameters of the microclimate in the passenger compartment was assessed.

Discussion and conclusion. Based on the numerical solution of the system of heat transfer equations, directions for further research and recommendations are formulated to ensure thermal comfort in the passenger compartment of a wheeled vehicle at low temperatures. The materials of the work may be of interest to specialists involved in the design and ergonomics of wheeled vehicles, labor protection.

KEYWORDS: heating system, microclimate parameters, thermal comfort, external respiration, passenger compartment, vehicle

The article was submitted 12.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Aleshkov D.A., Banket M.V., Sukovin M.V. Development of a simulation model of the heating process in the passenger cabin of a vehicle under low temperature conditions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 510-523. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-510-523>

© Aleshkov D.A., Banket M.V., Sukovin M.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Доставка работников к месту производства работ и обратно может достигать 2 ч, что составляет порядка 30% рабочего времени, и, соответственно, микроклимат пассажирского салона оказывает непосредственное влияние на здоровье работника и его последующую работоспособность [1, 2]. При этом в условиях вахтового режима работы, для отдельных категорий работающих, микроклимат пассажирского салона становится фактором, оказывающим свое воздействие в течение шести дней из недельного цикла. Таким образом, вопрос обеспечения теплового комфорта и оптимальных условий в пассажирском салоне колесного транспортного средства как не только инструмента профилактики холодовых травм, но и минимизации периода выработки является одним из приоритетных.

Исследования теплового комфорта человека представлены достаточно широко. Они охватывают практически все элементы техносферы [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], а также особенности распределения параметров микроклимата при различных положениях и позах человека в пространстве, обусловленные спецификой его деятельности и конструктивными решениями ограниченных пространств [4].

Исследования [16, 17, 18] связаны с изучением работы системы терморегуляции организма человека и его реакцией на нагревающий и охлаждающий микроклимат, таких как модель терморегуляции Калифорнийского университета в Беркли (UCB) и мультисегментная модель Пирса (MS), в том числе и в салоне колесного транспортного средства [19, 20], целью которых является совершенствование методик объективной оценки субъективных ощущений, вызванных воздействием параметров производственного микроклимата. В работе [21] дано описание наиболее известных в настоящее время методов оценки теплового комфорта.

Необходимо отметить, что исследования микроклимата в замкнутых пространствах развиваются в нескольких направлениях – это экспериментальные исследования с использованием теплового манекена и повышением его адекватности [3, 12], а также экспериментальные исследования параметров микроклимата существующих систем обеспечения теплового комфорта в пассажирском салоне автомобилей [11, 12] и автобусов [11], в том числе и с использованием полноразмерной климатической камеры [20]. Результаты экс-

периментальных исследований параметров микроклимата и состава атмосферы пассажирского салона для различных моделей колесных транспортных средств в условиях жаркого климата представлены в [13]. В [14] даны результаты экспериментов по оценке работы системы обеспечения теплового комфорта с учетом создания естественной вентиляции салона в условиях высоких температур внешней среды. К экспериментальным исследованиям работы системы отопления пассажирского салона колесного транспортного средства в условиях воздействия низких температур относится работа [15], количество таких исследований существенно меньше по сравнению с исследованиями в направлении изучения воздействия высоких температур. Одна из задач, которую решают экспериментальные исследования регулирования теплового комфорта в пассажирском салоне, – это определение фактических значений начальных и граничных условий математических моделей для их дальнейшего численного решения на ЭВМ с учетом субъективного восприятия параметров микроклимата человеком [15]. Разработка систем регулирования микроклимата представлена в [8, 16, 21, 22], а оценка их эффективности по таким показателям, как потребление энергии, тепловой комфорт и качество воздуха в [9, 23, 24, 25, 26, 27].

Теоретические исследования систем регулирования микроклимата и его влияния на человека базируются на компьютерных моделях [3, 4, 6, 7, 22, 23, 27]. В работе [28] дан сравнительный анализ и оценка возможностей различных реализаций математических моделей газовой и термодинамики на ЭВМ. Повышение точности реализаций на ЭВМ термодинамических моделей обеспечивается за счет конгруэнтности 3D-моделей, использования продвинутых вычислительных алгоритмов и учета всех участников создания теплового баланса [25, 27]. Учет сил трения и аэродинамических сил в обеспечении теплового комфорта рассматривается в [26], а роль солнечной радиации и излучения панелей внутреннего интерьера салона в [12, 21, 25]. В работе [30] представлено описание основных параметров микроклимата в салоне автомобиля и факторы, присущие пассажирам. Однако автор в явном виде не указывает на такой фактор, как изменение газового состава, обусловленного в том числе дыханием пассажира, которое является составным элементом массовых уравнений термодинамики пассажирского салона колесного транспортного средства [24]. В

работе [31] представлен анализ параметров, характеризующих состояние теплового комфорта, которые могут быть смоделированы в кабинах автобусов, указывается актуальность более глубоких исследований именно пассажирского салона автобуса, соответствующая попытка была предпринята в работе [7] для колесного транспортного средства категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров. Необходимо отметить, что в работе [7] решение задачи термодинамики решается с использованием UDF-функции, которые широко используются в различных сферах как средство создания более реалистичных математических моделей в среде ANSYS [41, 42]. В работе [43] представлены результаты моделирования нестационарного течения воздуха как смеси, содержащей твердые частицы в крупных воздухоносных путях с использованием ANSYS.

Что касается изменения газового состава в процессе дыхания человека, проведено достаточно большое количество исследований по определению его состава в выдыхаемом воздухе, в том числе и для различных состояний здоровья человека и при различных внешних нагрузках [40]. В работе [32] дана теоретическая оценка количественного изменения газового состава в салоне колесного транспортного средства в зависимости от времени и количества пассажиров. Направление исследований внешнего дыхания человека развивается с позиций распределения химических соединений в зоне дыхания человека и их попадания в его организм или представления человека как источника загрязнения внешней среды [33, 34].

Таким образом, в настоящее время проведены исследования влияния практически всех элементов технической системы колесного транспортного средства на достижение теплового комфорта в салоне [25, 26, 35]. Дана оценка возникающих субъективных ощущений пассажиров при воздействии определенных условий микроклиматических условий [4, 20]. Изучены различные схемы регулирования микроклимата и обеспечения теплового комфорта для различных типов колесных транспортных средств [9, 15, 22]. Произведена оценка изменения параметров микроклимата во времени и различных условиях движения колесного транспортного средства [11, 20]. Установлено, что параметры микроклимата в салоне в процессе движения не носят стационарный характер, а также субъективные ощущения теплового комфорта различны при движении транспортного средства и когда оно неподвиж-

но [12, 11, 12]. Однако практически все работы рассматривают обеспечение теплового комфорта в условиях нагревающего микроклимата [6, 7, 9, 12, 13, 14, 27], при этом пассажиры представляют собой пассивные рецепторы в контексте окружающей среды [33] и в явном виде не учитывается их количество. Применение компьютерного моделирования позволяет корректно решать сложные задачи газо- и теплообмена и может быть использовано для оценки совместного изменения газового состава и параметров микроклимата в пассажирском салоне. Следовательно, оценка эффективности работы системы отопления в условиях охлаждающего микроклимата в холодный период года и определение фактических значений параметров микроклимата в салоне для колесных транспортных средств категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров с учетом внешнего дыхания человека и влияния этого на газовый состав в салоне как составного элемента в обеспечении теплового комфорта является одним из дальнейших направлений исследований в регулировании микроклимата пассажирского салона колесного транспортного средства.

Система «пассажир–пассажирский салон транспортного средства» представляет собой сложную термодинамическую систему. В процессе дыхания пассажир транспортного средства вместе с выдыхаемым воздухом выделяет тепло в окружающее пространство, а также в процессе дыхания изменяется газовый состав атмосферы пассажирского салона. Представляет практический интерес оценка степени влияния данного механизма тепло- и газообмена на качественную картину распределения основных параметров микроклимата в пассажирском салоне.

Основной целью данного исследования являлась оценка возможности определения количественных значений параметров микроклимата в пассажирском салоне с учетом переменных граничных условий, моделирующих дыхание пассажира.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- построение расчетной схемы пассажирского салона колесного транспортного средства категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров;

- разработка математической модели формирования микроклимата в пассажирском салоне с учетом дыхания пассажиров с использованием UDF-функции;

- численное решение на ЭВМ и получение количественных значений параметров микроклимата и газового состава в пассажирском салоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим колесное транспортное средство категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров (рисунок 1). Данный тип достаточно широко задействован в перевозочном процессе пассажиров на городских маршрутах и маршрутах пригородного сообщения.

Теоретическое исследование динамики производственного микроклимата, изменения количества CO_2 и водяного пара в атмосфере пассажирского салона с учетом работы системы отопления будем проводить на двухмерной модели в расчетной вертикальной плоскости, проходящей через ряд пассажирских сидений и отопитель пассажирского салона, аналогично [8].

Геометрическая модель пассажирского салона колесного транспортного средства категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров представлена на рисунке 1. Расчетная площадь в пассажирском салоне составила $85853,0099 \text{ см}^2$.

Расчетная схема представлена на рисунке 1.

При составлении расчетной схемы были приняты следующие допущения:

- температура стенок пассажирского салона, T_1 , постоянна;
- температура наружных покровов поверхности пассажиров, T_2 , постоянна;
- концентрация органических соединений и CO_2 в выдыхаемом воздухе 4%, концентрация паров H_2O – 6% [40] в отличие от модели, описанной в [8], где качественный состав газа не учитывался;
- температура воздуха, выдыхаемого пассажирами, постоянна;
- температура, T_k , и скорость, V_k , движения воздуха, подаваемого в салон системой отопления колесного транспортного средства категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров, постоянна;
- скорость, V_k , движения воздуха, подаваемого в салон системой отопления колесного транспортного средства, направлена по горизонтали;
- границы твердых тел абсолютно гладкие;
- все пассажиры находятся в положении сидя;
- асинхронность дыхания пассажиров моделировалась сдвигом дыхательного цикла во времени одного из пассажиров, еще одно допущение целью которого являлось создание более реалистичной модели по сравнению с [8];
- продолжительность вдоха равна продолжительности выдоха;

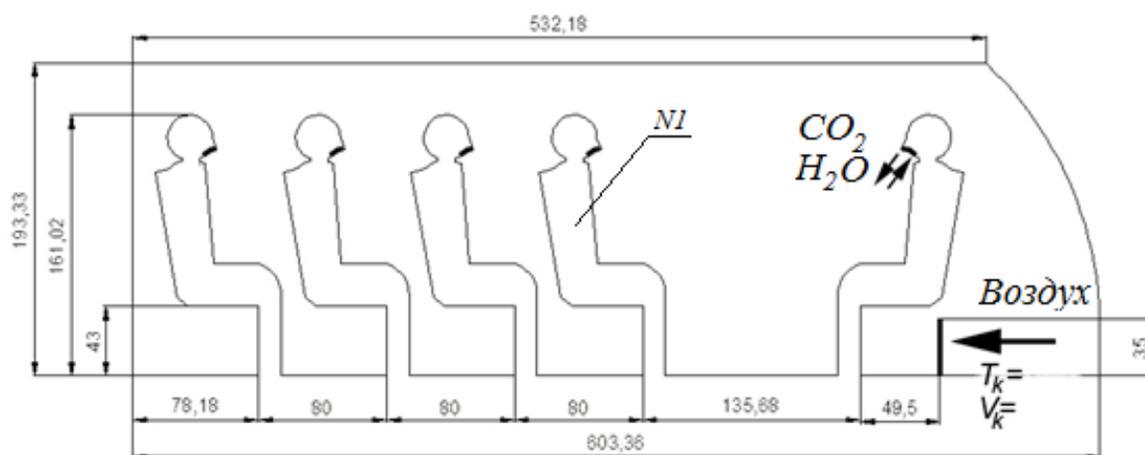


Рисунок 1 – Геометрическая модель пассажирского салона колесного транспортного средства категории M_3 вместимостью не более 22 пассажиров

Figure 1 – Geometric model of the passenger compartment of a M_3 category wheeled vehicle with a maximum capacity of 22 passengers

- процесс вдоха-выдоха описывался законом изменения скорости воздуха на вдохе и выдохе, V_2 , в зависимости от времени, t , и имеет аналогичный вид, указанный в работе [43]:

$$V_2 = a \cdot \cos(b \cdot t), \quad (1)$$

где a , b – коэффициенты пропорциональности.

В качестве граничных условий принимались следующие параметры:

- температура стенок пассажирского салона транспортного средства принималась равной $T_1=253$ К, что, согласно СП 131.13330.2012, соответствует температуре воздуха обеспеченностью 0,94 для г. Красноярск, Магадана, ряда поселений Республики Коми, а также принята с определенными допущениями для Омска и Новосибирска;

- температура наружных покровов поверхности пассажиров, основываясь на [4, 6] и с учетом [39], составляла $T_2=305$ К;

- температура выдыхаемого пассажирами воздуха равнялась 306 К;

- размеры внешней границы вдоха, выдоха пассажира имела размеры, соответствующие диаметру окружности 0,013 м, что соответствовало эквивалентной площади, через которую осуществляется вдох, выдох 0,0028 м² [34,37];

- в выходном сечении отопителя температура воздуха, T_k , принималась равной 328 К [39];

- скорость движения воздуха в выходном сечении отопителя составляла 2,88 м/с, при величине производительности отопителя 250 м³/ч [39].

Характеристики материалов, используемых при моделировании, имели следующие значения:

- корпус салона колесного транспортного средства изготовлен из полиуретана с плотностью $\rho_1=70$ кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,05 В/м²К и удельной теплоемкостью $c_{p1}=1685,6$ Дж/(кг·К) [26];

- наружный покров поверхности пассажиров представляет собой материал с плотностью $\rho_2=1000$ кг/м³ [26], удельной теплоемкостью $c_{p2}=3770$ Дж/(кг·К) и коэффициентом

теплопроводности 0,21 Вт/м²К. Общий тепловой поток через поверхность кожи пассажира составлял 85 Вт, что соответствует рабочей позе сидя и площади поверхности тела 1,5 м², величина 69,93 Вт/м² и 90,9 Вт/м² [26]. Характеристики одежды имели значения коэффициента теплопроводности 0,04 В/м²К и удельной теплоемкости 1480 Дж/(кг·К) соответственно [26].

Расчет параметров микроклимата в рассматриваемом сечении салона транспортного средства осуществлялся в ANSYSFluent. Математическая модель учитывала обмен энергии и использовала стандартную к-ε-модель турбулентности [22, 28].

Моделирование дыхания в ANSYSFluent осуществлялось с помощью UDF-функции [29]. Процесс дыхания задавался гармонической функцией (1). Значения коэффициентов пропорциональности принимались с учетом [34, 36, 37] таким образом, чтобы максимальное значение скорости вдыхаемого, выдыхаемого воздуха находилось в диапазоне от 2,0 до 2,3 м/с [34, 37], расход газа составлял 1,368 10⁻⁵ м³/с [34], а продолжительность одного дыхательного цикла была равна 4,2 с, что соответствует частоте дыхания 14,26 мин⁻¹. Адекватность принимаемых значений коэффициентов пропорциональности и вида функции также были подтверждены результатами натурных измерений времени поднятия, опускания грудной клетки и ускорения изменения ее объема в процессе дыхания. При проведении измерений испытуемый находился в состоянии покоя в положении сидя, в условиях микроклимата, соответствующего оптимальному, согласно СанПиН 1.2.3685-21. В качестве регистратора изменений положения грудной клетки использовался аппаратно-программный комплекс Arduino и аналоговый акселерометр на базе ADXL335. Построение уравнения регрессии осуществлялось в программе Statistica. Величина коэффициента детерминации составила R²=0,84 при следующих значениях уравнения (1): a=0,325; b=0,506 для значений ускорений точки измерений грудной клетки. На рисунке 2 представлена зависимость полученных экспериментальных значений от времени и значений уравнения регрессии.

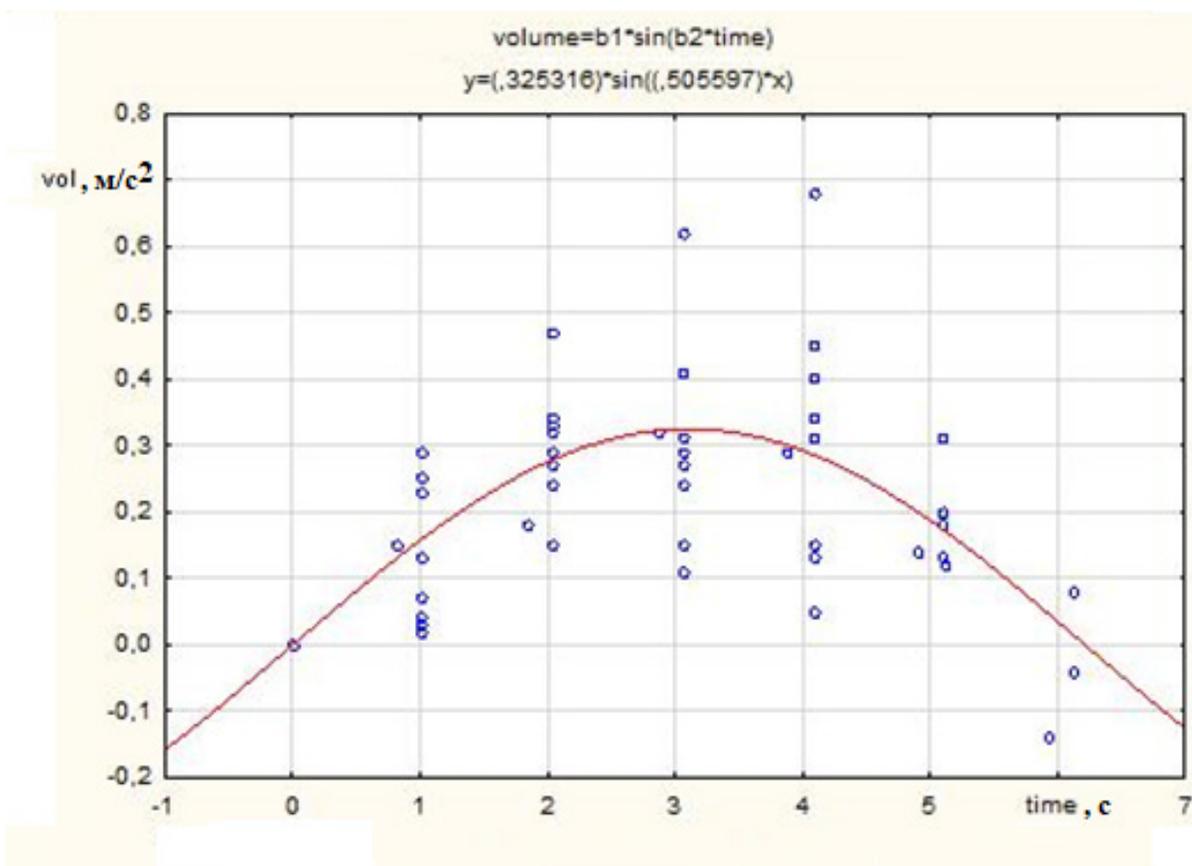


Рисунок 2 – Результаты наблюдений и значения полученного уравнения регрессии в зависимости от времени вдоха, выдоха

Figure 2 – Observational results and values of the resulting regression equation as a function of inhalation time, exhalation time

Периодичность внешнего дыхательного цикла дает хорошую сходимость с представленными ранее значениями. Соответственно, для описания скорости изменения вдыхаемой и выдыхаемой газовой смеси используем выражение [8].

Для пассажира №1 на рисунке 1 реализовано смещение дыхательного цикла относительно других пассажиров, дыхание которых синхронно. Смещение дыхательного цикла имеет вид

$$V_2 = 2 \cdot \cos(1,57 \cdot t + \pi), \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты вычислений параметров температуры воздуха в атмосфере пассажирского салона, T , К, скорости движения воздуха по высоте, v , м/с, и длине, u , м/с, пассажирского салона, изменения полного давления, P , Па, массовых долей CO_2 и H_2O в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений представлены на рисунках 3, 4, 5, 6, 7, а также изменение концентрации CO_2 и паров H_2O в зоне дыхания пассажира №1 (рисунок 8).

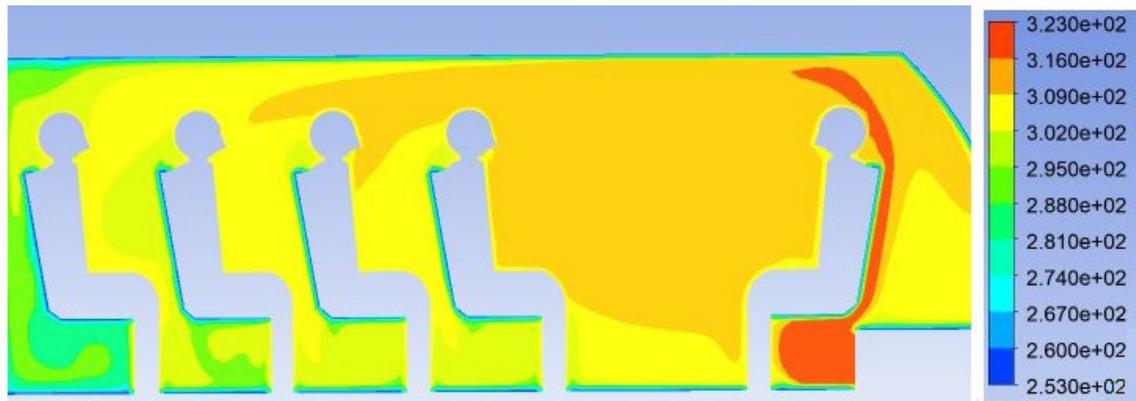


Рисунок 3 – Распределение абсолютных значений температуры воздуха, T , K , при учете изменения газового состава в выдыхаемом пассажирами воздухе в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений

Figure 3 – Distribution of absolute values of air temperature, T , K , when accounting for changes in gas composition in exhaled air of passengers in the passenger compartment of a wheeled vehicle after 100s of calculations



Рисунок 4 – Распределение значений проекции вектора скорости воздуха, v , m/s , при учете изменения газового состава в выдыхаемом пассажирами воздухе в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений

Figure 4 – Distribution of air velocity vector projection values, v , m/s , when accounting for changes in gas composition in exhaled air of passengers in the passenger compartment of a wheeled vehicle after 100s of calculations

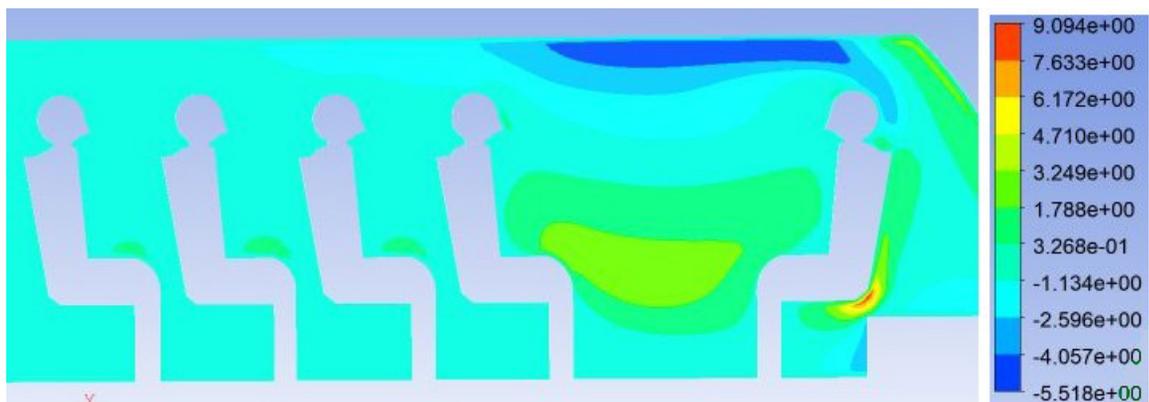


Рисунок 5 – Распределение значений проекций вектора скорости воздуха, u , m/s , при учете изменения газового состава в выдыхаемом пассажирами воздухе в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений

Figure 5 – Distribution of air velocity vector projections, u , m/s , when accounting for changes in gas composition in exhaled air of passengers in the passenger compartment of a wheeled vehicle after 100s of calculations

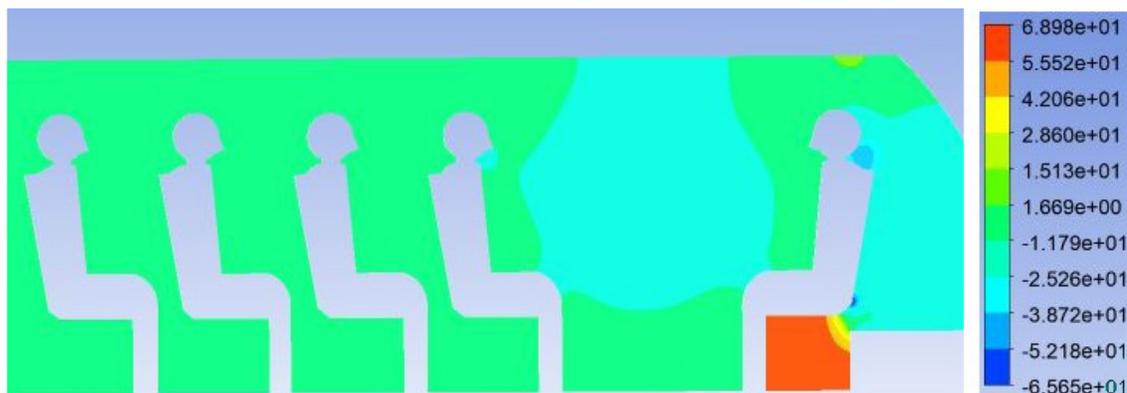


Рисунок 6 – Распределение значений давления воздуха, P , при учете изменения газового состава в выдыхаемом пассажирами воздухе в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений

Figure 6 – Distribution of air pressure values, P , when accounting for changes in gas composition in exhaled air in the passenger compartment of a wheeled vehicle after 100s of calculations



а



б

Рисунок 7 – Распределение значений газов в воздухе в салоне колесного транспортного средства после 100 с вычислений: а – CO_2 , %; б – H_2O , %

Figure 7 – Distribution of gas values in the air in the passenger compartment of a wheeled vehicle after 100s of calculations: a – CO_2 , %; b – H_2O , %

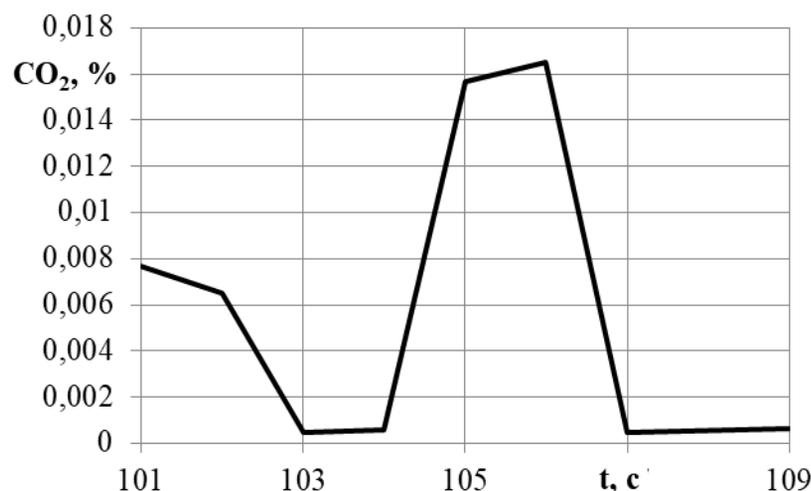


Рисунок 8 – Распределение значений CO₂ в зоне дыхания пассажира №1 в зависимости от времени

Figure 8 – Distribution of CO₂ values in the breathing zone of passenger 1 as a function of time

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- максимальная массовая доля CO₂ приходится на заключительную фазу выдоха, при этом она наблюдается в нижней части пассажирского салона;

- сокращение расстояния между пассажирскими сиденьями ухудшает процесс распределения продуктов дыхания по пассажирскому салону, создавая их высокие концентрации;

- в зоне дыхания первых трех пассажиров по ходу движения колесного транспортного средства наблюдаются повышенные концентрации CO₂ по сравнению с пассажирами в дальней части салона;

- избыточное давление для представленной в расчетной модели системы отопления соответствует требованиям ГОСТ Р 53828–2010, ГОСТ 8802–78.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система регулирования микроклимата в пассажирском салоне колесного транспортного средства категории М₃ вместимостью не более 22 пассажиров должна обеспечивать постоянное поступление воздуха. Исключение воздухообмена с внешней средой в пассажирском салоне приведет к быстрому росту массовой доли продуктов дыхания и негативному влиянию на состояние здоровья пассажиров, а также негативным субъективным ощущениям восприятия макроклимата пассажирского

салона, особенно в условиях низких температур. Действительный характер распределения продуктов дыхания по объему пассажирского салона представляется возможным оценить только на пространственной модели пассажирского салона колесного транспортного средства категории М₃ вместимостью не более 22 пассажиров. Представляет интерес оценка возможности рекуперации атмосферы пассажирского салона в системе его отопления, что возможно при получении результатов расчета нескольких дыхательных циклов. Установлена необходимость учета субъективных особенностей внешнего дыхания пассажиров как во времени, так и по объему, а также оценка возможности создания специальных систем отопления и вентиляции пассажирского салона в зависимости от субъективных особенностей состава выдыхаемого воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берестнева О.Г., Жаркова О.С., Шевелев Г.Е., Уразаев А.М. Методика анализа адаптационных процессов при вахтовом режиме труда рабочих-нефтяников // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. 212 с.
2. Cui, Weilin & Cao, Guoqiang & Park, Jung & Ouyang, Qin & Zhu, Yingxin. (2013). Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. Building and Environment. 68. 114-122. 10.1016/j.buildenv.2013.06.012.
3. Croitoru, C., et al. Numerical and experimental modeling of airflow and heat transfer of a human body. in Roomvent 2011. 2011. Trondheim, Norway

4. Aliahmadipour, Mohammad & Abdolzadeh, Morteza & Lari, Khosro. (2017). Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach. *Applied Thermal Engineering*. 123. 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.086.
5. Bosbach, Johannes & Lange, Sven & Dehne, Tobias & Lauenroth, Gerrit & Hesselbach, Florian & Allzeit, Michael. (2013). Alternative Ventilation Concepts for Aircraft Cabins. *CEAS Aeronautical Journal*. 4. 301–313. 10.1007/s13272-013-0074-z.
6. Canbolat, Ahmet & Türkan, Burak & Etemoglu, A. & Can, M. (2016). Numerical investigation into thermal comfort conditions in a midibus. *The Journal of MacroTrends in Applied Science*. 4. 13-23
7. Ivanescu, M.; Neacsu, C. A.; Tabacu, I. Studies of the Thermal Comfort Inside of the Passenger Compartment Using the Numerical Simulation. In: *International Congress Motor Vehicles & Motors 2010*, Kragujevac, Oct. 7-9. 2010
8. Aleshkov, Denis & Banket, Mikhail & Sukovin, Mikhail & Pogulyaeva, Irina & Yanchij, Svetlana. (2020). Theoretical studies of the heating system in the vehicle compartment during passenger transportation taking into account breathing under conditions of low temperatures. *Journal of Applied Engineering Science*. 18. 346-354. 10.5937/jaes18-27264.
9. Mao, Yiyi & Wang, Ji & Li, Jun-Ming. (2018). Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Applied Thermal Engineering*. 137. 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.099.
10. Zhang, Huajun & Dai, Lan & Xu, Guoquan & Li, Yong & Chen, Wei & Tao, Wen-Quan. (2009). Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: Test/numerical model and validation. *Applied Thermal Engineering*. 29. 2022-2027. 0.1016/j.applthermaleng.2008.10.005.
11. Ünal, Şaban. (2017). An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Journal of Thermal Engineering*. 3. 1089-1101. 10.18186/thermal.277288.
12. Zhou, Xiaojie & Lai, Dayi & Chen, Qingyan. (2018). Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions. *Building and Environment*. 149. 10.1016/j.buildenv.2018.12.022.
13. Paul Alexandru, Danca & Nastase, Ilinca & Bode, Florin & Croitoru, Cristiana & Angel, Dogeanu & Meslem, Amina. (2019). Evaluation of the thermal comfort for its occupants inside a vehicle during summer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 595. 012027. 10.1088/1757-899X/595/1/012027.
14. Khaiwal, Ravindra & Agarwal, Neha & Mor, Suman. (2020). Assessment of thermal comfort parameters in various car models and mitigation strategies for extreme heat-health risks in the tropical climate. *Journal of Environmental Management*. 267. 110655. 10.1016/j.jenvman.2020.110655.
15. He, Yansong & Yang, Jie & Ling, Jing & Du, Yafei & Zhang, Zhifei. (2020). Predictive modeling for overall thermal sensation of vehicle occupants based on local thermal sensation when warming up. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 095440702090256. 10.1177/0954407020902564.
16. Lange, Pascal & Schmeling, Daniel & Hoermann, Hans & Volkmann, André. (2019). Comparison of local equivalent temperatures and subjective thermal comfort ratings with regard to passenger comfort in a train compartment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 609. 032042. 10.1088/1757-899X/609/3/032042.
17. Foda, Ehab & Almesri, Issa & Awbi, H.B & Sirén, Kai. (2011). Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. *Building and Environment*. 46. 2023-2032. 10.1016/j.buildenv.2011.04.010.
18. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments Charlie Huizenga Zhang Hui, Edward Arens *Building and Environment* 36 (2001) 691–699
19. Foda E, Sirén K (2011) A new approach using the pierce two-node model for different body parts. *Int J Biometeorol* 55:519–532.
20. Alahmer, Ali & Abdelhamid, Mahmoud & Omar, Mohammed. (2012). Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins. *Applied Thermal Engineering*. 36. 126–140. 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.056.
21. Paul Alexandru, Danca & Vartires, Andreea & Angel, Dogeanu. (2016). An Overview of Current Methods for Thermal Comfort Assessment in Vehicle Cabin. *Energy Procedia*. 85. 162-169. 10.1016/j.egypro.2015.12.322.
22. Yang, C.-J.; Yang, T.-C.; Chen, P.-T.; Huang, K.D. An Innovative Design of Regional Air Conditioning to Increase Automobile Cabin Energy Efficiency. *Energies* 2019, 12, 2352.
23. Croitoru C., Nastase I., Bode F., Meslem A., Dogeanu A., Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44 (2015) 304-318.
24. Paul Alexandru, Danca & Bode, Florin & Nastase, Ilinca & Meslem, Amina. (2018). CFD simulation of a cabin thermal environment with and without human body – thermal comfort evaluation. *E3S Web of Conferences*. 32. 01018. 10.1051/e3sconf/20183201018.
25. Kristanto, D.; Leephakpreeda, T. Sensitivity analysis of energy conversion for effective energy consumption, thermal comfort, and air quality within car cabin. *Energy Procedia* 2017, 138, 552–557.
26. Khatoon, Saboor & Kim, Man Hoe. (2020). Thermal Comfort in the Passenger Compartment Using a 3-D Numerical Analysis and Comparison with Fanger's Comfort Models. *Energies*. 13. 690. 10.3390/en13030690.
27. Garrett J. Marshall, Colin P. Mahony, Matthew J. Rhodes, Steve R. Daniewicz, Scott M. Thompson *Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview Engineering Volume 5, Issue 5 October 2019 Pages 954-969*
28. Chen, Q. Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.* 1995, 28, 353–369.

29. ANSYS/FLUENT User's Manual, Release Version 14.5, 2012, Ansys Inc. Available online: <https://www.ansys.com> (accessed on 16 April 2019).

30. Simion, M.; Socaci, L.; Unguresan, P. Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles. *Energy Procedia* 2016, 85, 472–480. Mao, Y.; Wang, J.; Li, J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Appl. Therm. Eng.* 2018, 137, 356–367.

31. Almeida, Matheus & Paula Xavier, Antonio & Michaloski, Ariel & Luiz Soares, André. (2020). Thermal Comfort in Bus Cabins: A Review of Parameters and Numerical Investigation. 10.1007/978-3-030-41486-3_54.

32. H. Jung. Modeling CO2 Concentrations in Vehicle Cabin. *SAE Int.* pp. 1–6. 2013.

33. Bivolarova, Mariya & Kierat, Wojciech & Zavr, Eva & Zbigniew, Popiolek & Melikov, Arsen. (2017). Effect of airflow interaction in the breathing zone on exposure to bio-effluents. *Building and Environment*. 125. 10.1016/j.buildenv.2017.08.043.

34. Vianello, Alvise & Jensen, Rasmus & Liu, Li & Vollertsen, Jes. (2019). Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*. 9. 8670. 10.1038/s41598-019-45054-w.

35. Garrett J. Marshall Colin P. Mahony Matthew J. Rhodes Steve R. Daniewicz Nicholas Tsolas Scott M. Thompson (2019) Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview. *Engineering*. Volume 5, Issue 5, October 2019, Pages 954-969

36. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Бабушкина А.В. Моделирование течения запыленного воздуха в респираторном тракте // Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22. № 3. С. 301–314.

37. Rim, Donghyun & Novoselac, Atila. (2009). Transport of particulate and gaseous pollutants in the vicinity of a human body. *Building and Environment*. 44. 1840-1849. 10.1016/j.buildenv.2008.12.009.

38. Потехина Ю.П., Голованова М.В. Причины изменения локальной температуры тела // Медицинский альманах. 2010. № 2 (11). С. 297–298.

39. Бендерский Б.Я., Петров Р.А. Исследование пространственных процессов отопления салона автобуса // Грузовик. 2017. № 6. С. 3–8.

40. Никифорова О.Ю., Пономарев Ю.Н., Карапузилов А.И. Учет влажности пробы выдыхаемого воздуха при детектировании газов-биомаркеров // Оптика атмосферы и океана, 2013. №4(26). С.336–341.

41. Федорова Э.Р. CFD-моделирование сгустителя красных шламов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №12(54). С.194–200.

42. Купцов А.И. Экологический мониторинг. CFD-технологии. UDF-функции // Вестник технологического университета. 2015. №20(18). С.203–206.

43. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Бабушкина А.В. Моделирование течения запыленного воздуха в респираторном тракте // Российский журнал биомеханики. №3(22). 2015. С.301–314.

REFERENCES

1. Berestneva O.G., Zharkova O.S., Shevelev G.E., Urazaev A.M. Metodika analiza adaptacionnyh processov pri vahtovom rezhime truda rabochih-neftjanikov [Methodology of the analysis of adaptation processes in the shift mode of work of oil workers] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, 4: 212. (in Russian)

2. Cui, Weilin & Cao, Guoguang & Park, Jung & Ouyang, Qin & Zhu, Yingxin. (2013). Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. *Building and Environment*. 68. 114-122. 10.1016/j.buildenv.2013.06.012.

3. Croitoru, C., et al. Numerical and experimental modeling of airflow and heat transfer of a human body. *inRoomvent 2011*. 2011. Trondheim, Norway

4. Aliahmadipour, Mohammad & Abdolzadeh, Morteza & Lari, Khosro. (2017). Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach. *Applied Thermal Engineering*. 123. 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.086.

5. Bosbach, Johannes & Lange, Sven & Dehne, Tobias & Lauenroth, Gerrit & Hesselbach, Florian & Allzeit, Michael. (2013). Alternative Ventilation Concepts for Aircraft Cabins. *CEAS Aeronautical Journal*. 4. 301–313. 10.1007/s13272-013-0074-z.

6. Canbolat, Ahmet & Türkan, Burak & Etemoglu, A. & Can, M.. (2016). Numerical investigation into thermal comfort conditions in a midibus. *The Journal of Macro-Trends in Applied Science*. 4. 13-23

7. Ivanescu, M.; Neacsu, C. A.; Tabacu, I. Studies of the Thermal Comfort Inside of the Passenger Compartment Using the Numerical Simulation. In: *International Congress Motor Vehicles & Motors 2010*, Kragujevac, Oct. 7-9. 2010

8. Aleshkov, Denis & Banket, Mikhail & Sukovin, Mikhail & Pogulyaeva, Irina & Yanchij, Svetlana. (2020). Theoretical studies of the heating system in the vehicle compartment during passenger transportation taking into account breathing under conditions of low temperatures. *Journal of Applied Engineering Science*. 18. 346-354. 10.5937/jaes18-27264.

9. Mao, Yiyi & Wang, Ji & Li, Jun-Ming. (2018). Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Applied Thermal Engineering*. 137. 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.099.

10. Zhang, Huajun & Dai, Lan & Xu, Guoquan & Li, Yong & Chen, Wei & Tao, Wen-Quan. (2009). Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: Test/numerical model and validation. *Applied Thermal Engineering*. 29. 2022-2027. 0.1016/j.applthermaleng.2008.10.005.

11. Ünal, Şaban. (2017). An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Journal of Thermal Engineering*. 3. 1089-1101. 10.18186/thermal.277288.

12. Zhou, Xiaojie & Lai, Dayi & Chen, Qingyan. (2018). Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions. *Building and Environment*. 149. 10.1016/j.buildenv.2018.12.022.

13. Paul Alexandru, Danca&Nastase, Ilinca&Bode, Florin & Croitoru, Cristiana & Angel, Dogeanu&Meslem, Amina. (2019). Evaluation of the thermal comfort for its occupants inside a vehicle during summer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 595. 012027. 10.1088/1757-899X/595/1/012027.
14. Khaiwal, Ravindra& Agarwal, Neha & Mor, Surman. (2020). Assessment of thermal comfort parameters in various car models and mitigation strategies for extreme heat-health risks in the tropical climate. *Journal of Environmental Management*. 267. 110655. 10.1016/j.jenvman.2020.110655.
15. He, Yansong& Yang, Jie& Ling, Jing& Du, Ya-fei& Zhang, Zhifei. (2020). Predictive modeling for overall thermal sensation of vehicle occupants based on local thermal sensation when warming up. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 095440702090256. 10.1177/0954407020902564.
16. Lange, Pascal & Schmeling, Daniel & Hoermann, Hans & Volkmann, André. (2019). Comparison of local equivalent temperatures and subjective thermal comfort ratings with regard to passenger comfort in a train compartment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 609. 032042. 10.1088/1757-899X/609/3/032042.
17. Foda, Ehab&Almesri, Issa&Awbi, H.B & Sirén, Kai. (2011). Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. *Building and Environment*. 46. 2023-2032. 10.1016/j.buildenv.2011.04.010.
18. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments Charlie Hui-zenga Zhang Hui, Edward Arens *Building and Environment* 36 (2001) 691–699
19. Foda E, Sirén K (2011) A new approach using the pierce two-node model for different body parts. *Int J Biometeorol* 55:519–532.
20. Alahmer, Ali & Abdelhamid, Mahmoud & Omar, Mohammed. (2012). Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins. *Applied Thermal Engineering*. 36. 126–140. 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.056.
21. Paul Alexandru, Danca&Vartires, Andreea& Angel, Dogeanu. (2016). An Overview of Current Methods for Thermal Comfort Assessment in Vehicle Cabin. *Energy Procedia*. 85. 162-169. 10.1016/j.egypro.2015.12.322.
22. Yang, C.-J.; Yang, T.-C.; Chen, P.-T.; Huang, K.D. An Innovative Design of Regional Air Conditioning to Increase Automobile Cabin Energy Efficiency. *Energies* 2019, 12, 2352.
23. Croitoru C., Nastase I., Bode F., Meslem A., Dogeanu A., Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44 (2015) 304-318.
24. Paul Alexandru, Danca& Bode, Florin & Nastase, Ilinca&Meslem, Amina. (2018). CFD simulation of a cabin thermal environment with and without human body – thermal comfort evaluation. *E3S Web of Conferences*. 32. 01018. 10.1051/e3sconf/20183201018.
25. Kristanto, D.; Leephakpreeda, T. Sensitivity analysis of energy conversion for effective energy consumption, thermal comfort, and air quality within car cabin. *Energy Procedia* 2017, 138, 552–557.
26. Khatoon, Saboor& Kim, Man Hoe. (2020). Thermal Comfort in the Passenger Compartment Using a 3-D Numerical Analysis and Comparison with Fanger's Comfort Models. *Energies*. 13. 690. 10.3390/en13030690.
27. Garrett J. Marshall, Colin P. Mahony, Matthew J. Rhodes, Steve R. Daniewicz, Scott M. Thompson *Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview Engineering Volume 5, Issue 5 October 2019 Pages 954-969*
28. Chen, Q. Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.* 1995, 28, 353–369.
29. ANSYS/FLUENT User's Manual, Release Version 14.5, 2012, Ansys Inc. Available online: <https://www.ansys.com> (accessed on 16 April 2019).
30. Simion, M.; Socaciu, L.; Unguresan, P. Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles. *Energy Procedia* 2016, 85, 472–480. Mao, Y.; Wang, J.; Li, J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Appl. Therm. Eng.* 2018, 137, 356–367.
31. Almeida, Matheus & Paula Xavier, Antonio & Michaloski, Ariel & Luiz Soares, André. (2020). Thermal Comfort in Bus Cabins: A Review of Parameters and Numerical Investigation. 10.1007/978-3-030-41486-3_54.
32. H. Jung. Modeling CO2 Concentrations in Vehicle Cabin. *SAE Int.* pp. 1–6. 2013.
33. Bivolarova, Mariya&Kierat, Wojciech&Zavrl, Eva & Zbigniew, Popiolek&Melikov, Arsen. (2017). Effect of airflow interaction in the breathing zone on exposure to bio-effluents. *Building and Environment*. 125. 10.1016/j.buildenv.2017.08.043.
34. Vianello, Alvise& Jensen, Rasmus& Liu, Li & Vollertsen, Jes. (2019). Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*. 9. 8670. 10.1038/s41598-019-45054-w.
35. Garrett J. Marshall Colin P. Mahony Matthew J. Rhodes Steve R. Daniewicz Nicholas Tsolas Scott M. Thompson (2019) *Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview. Engineering. Volume 5, Issue 5, October 2019, Pages 954-969*
36. Trusov P.V., Zajceva N.V., Cinker M. Ju., Babushkina A.V. Modelirovanie techenija zapylenogo vozduha v respiratornom trakte [Modeling of the flow of dusty air in the respiratory tract] *Rossijskij zhurnal biomehaniki*. 2018, T. 22, no 3, pp. 301-314.
37. Rim, Donghyun&Novoselac, Atila. (2009). Transport of particulate and gaseous pollutants in the vicinity of a human body. *Building and Environment*. 44. 1840-1849. 10.1016/j.buildenv.2008.12.009.
38. Potehina Ju.P., Golovanova M.V. Prichiny izmenenija lokal'noj temperatury tela [Causes of changes in local body temperature] // *Medicinskij al'manah* 2010, 2 (11): 297-298 (in Russian)

39. Benderskij B.Ja., Petrov R.A. Issledovanie prostranstvennyh processov otopenija salona avtobusa [Investigation of spatial processes of bus interior heating] // *Gruzovik*. 2017, 6: 3-8. . (in Russian)

40. Nikiforova O.Ju., Ponomarev Ju.N., Karapuzikov A.I. Uchet vlazhnosti proby vydyhaemogo vozduha pri detektirovanii gazov-biomarkerov [Accounting for the humidity of the exhaled air sample when detecting biomarker gases] // «*Optika atmosfery i okeana*», 2013, 26(4): 336-341. (in Russian)

41. Fedorova Je.R. CFD Modelirovanie sgustitelja krasnyh shlamov [CFD modeling of a red sludge thickener] «*Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*», 2016 12 (54):194-200. . (in Russian)

42. Kupcov A. I.Jekologicheskij monitoring. CFD-tehnologii. UDF-funkcii// «*Vestnik tehnologicheskogo universiteta*», 2015, 18(20): 203-206. (in Russian)

43. Trusov P.V., Zajceva N.V., Cinker M.Ju., Babushkina A.V. Modelirovanie techenija zapylenogo vozduha v respiratornom trakte [Modeling of the flow of dusty air in the respiratory tract] «*Rossijskij zhurnal biomehaniki*», 2015. 22(3): 301-314. . (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Алешков Д.С. Формулировка направления и темы исследования. Концептуализация, формулирование и исследование научной гипотезы. Формулирование проблемы исследования. Выбор методологии и методов исследования (33,3%).

Банкет М.В. Обзор результатов предшествующих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (33,3%).

Суковин М.В. Проверка теоретических предположений, аналитика результатов исследования, редактирование, формирование выводов. Валидация данных, рецензирование результатов, корреспонденция данных с иностранными авторами (33,3%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis A. Aleshkov, formulation of research direction and topic. Conceptualization, formulation and research of scientific hypothesis. Formulation of research problem. Selection of research methodology and methods (33.3 per cent).

Mikhail V. Banket, review of the results of previous studies. Setting of research objectives. Characterization of the algorithm of analytical studies. Formulation of results and conclusions (33.3%).

Mikhail V. Sukovin, testing of theoretical assumptions, analyst of research results, editing, forming conclusions. Validation of data, review of results, correspondence of data with foreign authors (33.3%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Банкет Михаил Викторович – канд. техн. наук, доц., декан факультета «Автомобильный транспорт» .

Суковин Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» .

AUTHOR INFORMATION

Denis A. Aleshkov, Cand, of Sci., Associate Professor of the Technical and Environmental Safety Department .

Mikhail V. Banket, Cand, of Sci., Associate Professor, Dean of the Automobile Transport Faculty .

Mikhail V. Sukovin, nd, of Sci., Associate Professor of the Technical and Environmental Safety Department.

Научная статья

УДК 621.43.056

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С СИСТЕМАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВПРЫСКА ТОПЛИВА

Г.Н. Вотинев, Д.В. Мальцев, Д.С. Репецкий

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

г. Пермь, Россия

vgn@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6859>

mdv@pstu.ru, orcid.org/0000-0001-5503-8784

repetsky@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9433-3209>

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение безотказной работы автомобильного транспорта является одной из приоритетных задач. Функционирование двигателя внутреннего сгорания, важнейшего агрегата, невозможно без корректной работы топливных форсунок. Современная электромагнитная форсунка является достаточно надежным элементом двигателя, однако может быстро выйти из строя при использовании некачественного топлива. Постоянный контроль технического состояния форсунок при помощи встроенных систем диагностики автомобиля позволит предотвратить такие негативные последствия, как перерасход топлива, образование вредных веществ в отработавших газах, ухудшение тягово-скоростных характеристик транспортного средства.

Материалы и методы. Исследования проводились методом физического моделирования, разработан лабораторный стенд, имитирующий работу топливной системы двигателя. В качестве объекта выбрана форсунка Bosch 0280 158 996, управление которой осуществлялось при помощи электронного блока на базе Arduino. Проведена серия однофакторных экспериментов, по результатам которых построена зависимость скорости падения давления от загрязненности сопла форсунки.

Результаты. Определен допустимый норматив скорости падения давления при работе электромагнитной форсунки, позволяющий однозначно определять её техническое состояние (исправна/неисправна). Предложен алгоритм проверки форсунок, а также способ его реализации на современных легковых автомобилях.

Обсуждение и заключение. Полученная зависимость качественно совпадает с результатами исследований других авторов. Существует успешный опыт внедрения подобных алгоритмов на современных автомобилях. Внедрение результатов исследования позволит своевременно выявлять неисправные (загрязненные) электромагнитные форсунки и предотвратить негативное воздействие как на детали двигателя, так и на экологию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитная форсунка, диагностика, легковой автомобиль, бензиновый двигатель внутреннего сгорания, загрязнение форсунок

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Вотинев, Г.Н., Мальцев Д.В., Репецкий Д.С. Контроль состояния электромагнитных топливных форсунок бензиновых двигателей с системами распределенного впрыска топлива // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 5(81). С. 524-533. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

© Вотинев Г.Н., Мальцев Д.В., Репецкий Д.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

MONITORING OF THE STATE OF ELECTROMAGNETIC FUEL INJECTORS OF GASOLINE ENGINES WITH DISTRIBUTED FUEL INJECTION SYSTEMS

Georgij N. Votinov, Dmitry V. Maltsev, Dmitry S. Repetsky
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
vgn@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6859>
mdv@pstu.ru, orcid.org/0000-0001-5503-8784
repetsky@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9433-3209>

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the trouble-free operation of road transport is one of the priority tasks. The functioning of the internal combustion engine, the most important unit, is impossible without the correct operation of the fuel injectors. A modern electromagnetic nozzle is a fairly reliable element of the engine, however, it can quickly fail when using low-quality fuel. Constant monitoring of the technical condition of the injectors with the help of built-in vehicle diagnostics systems will prevent such negative consequences as fuel overspending, the formation of harmful substances in the exhaust gases, deterioration of the traction and speed characteristics of the vehicle.

Materials and methods. The research was carried out by the method of physical modelling, a laboratory stand was developed that simulates the operation of the engine fuel system. As an object, the Bosch 0280 158 996 nozzle was selected, which was controlled using an Arduino-based electronic unit. A series of one-factor experiments was carried out, according to the results of which the dependence of the pressure drop rate on the contamination of the nozzle was constructed.

Results. The permissible standard of the pressure drop rate during the operation of the electromagnetic nozzle is determined, which allows unambiguously determining its technical condition (serviceable/not serviceable). An algorithm for checking injectors is proposed, as well as a method for its implementation on modern passenger cars.

Discussion and conclusion. The obtained dependence qualitatively coincides with the results of studies by other authors. There is a successful experience of implementing such algorithms on modern cars. The implementation of the research results will allow timely detection of faulty (contaminated) electromagnetic injectors and prevent negative effects on both engine parts and the environment.

KEYWORDS: electromagnetic nozzle, diagnostics, passenger car, gasoline internal combustion engine, nozzle contamination

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 15.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Votinov G.N., Maltsev D.V., Repetsky D.S. Monitoring of the state of electromagnetic fuel injectors of gasoline engines with distributed fuel injection systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 524-533. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-524-533>

© Votinov G.N., Maltsev D.V., Repetsky D.S., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильный транспорт играет важную роль при перевозке грузов и пассажиров. Транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) фактически не имеют конкуренции благодаря высоким тягово-скоростным характеристикам и достаточно большому запасу хода. Благодаря динамичному развитию электроники в последние десятилетия надежность транспортных средств неуклонно возрастает¹ [1, 2, 3, 4]. Однако естественный износ деталей, эксплуатационные загрязнения узлов и агрегатов пока еще широко распространены. Современный ДВС – это сложная мехатронная система, состоящая из механической и электронной частей. Его назначение – преобразование химической энергии топлива в механическую, поэтому одним из ключевых процессов работы ДВС является сгорание топлива. Корректность протекания этого процесса напрямую зависит от исправности электромагнитных топливных форсунок. Отказ или некорректная работа форсунок приводят к неустойчивой работе двигателя, иногда к дорогостоящему ремонту. Поэтому предупредительные меры по предотвраще-

нию отказов, такие как диагностика исправности форсунок, являются одной из актуальных задач, в том числе для повышения экономии топливно-энергетических ресурсов и уровня экологической безопасности.

По данным аналитического агентства АВТОСТАТ², количество транспортных средств в РФ за последние 10 лет увеличилось на 31%, в большей степени за счет роста числа легковых автомобилей и легкого коммерческого транспорта. По состоянию на 1 января 2021 г., парк транспортных средств составляет 60 млн ед., состав парка в процентном соотношении представлен на рисунке 1.

Все транспортные средства, за исключением прицепов и полуприцепов, оснащены ДВС. Структура парка и процентное соотношение силовых установок представлено в таблице.

Из таблицы видно, что на бензиновые силовые установки приходится почти 95% общей емкости парка. Двигатель состоит из большого количества деталей, узлов и вспомогательных систем. В рамках данного исследования представляет интерес система питания. Классификация системы питания бензиновых двигателей представлена на рисунке 2.

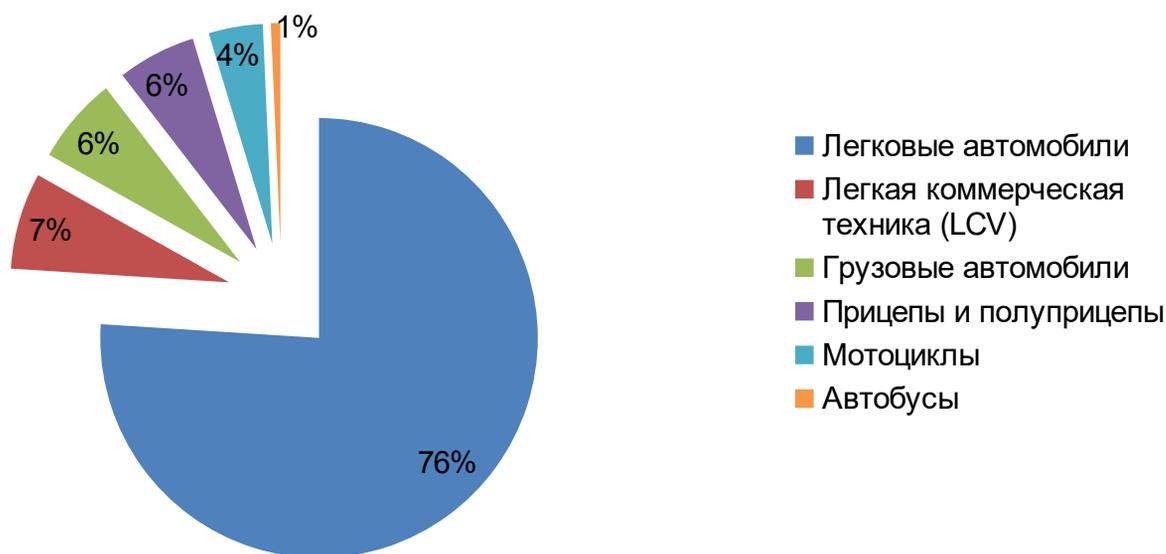


Рисунок 1 – Состав парка транспортных средств в России

Figure 1 – Vehicle fleet composition in Russia

¹ Филькин Н.М., Шаихов Р.Ф. Расчет показателей безотказности и долговечности унифицированной машины технологического электротранспорта // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень. 18 апреля 2019 года / Отв. ред. Н.С. Захаров. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет. 2019. С. 346–350

² Автомобильный парк: на чем ездят россияне? [Электронный ресурс] / Аналитическое агентство «Автостат»: официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/press-releases/47703/>

Таблица 1
Структура парка легковых автомобилей в РФ по типам силовой установки

Table 1
Structure of the car fleet in the Russian Federation by type of propulsion system

Тип силовой установки	Количество автомобилей, шт.	Процент от общего количества, %
Бензиновая	42 693 064	94,88
Дизельная	2 205 000	4,893
Гибридная	91 100	0,202
Электрическая	10 836	0,025
Общее	45 000 000	100

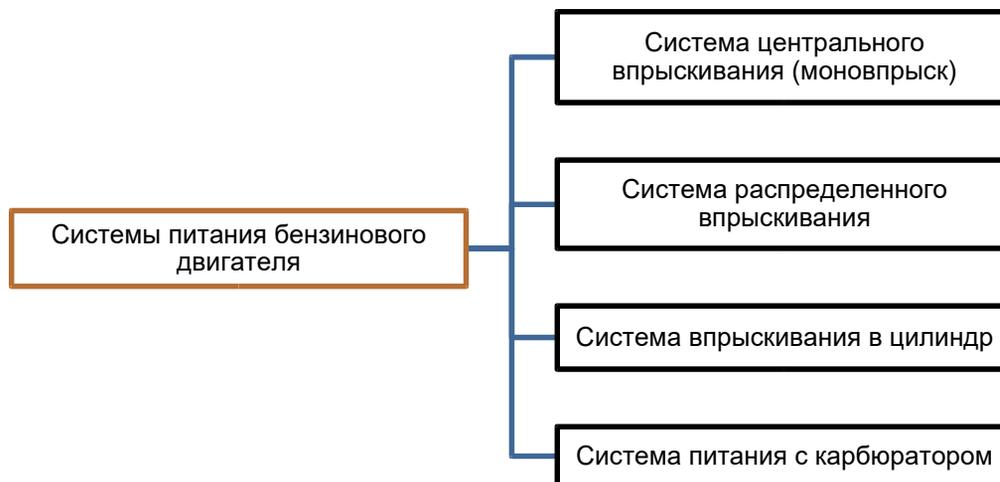


Рисунок 2 – Классификация систем питания бензинового двигателя

Figure 2 – Classification of gasoline engine feeding systems

Системы питания с карбюратором и центральным впрыском не применяются на легковых автомобилях и постепенно уходят с рынка ввиду своей малой эффективности, топливной экономичности и экологичности. Система с непосредственным впрыском, напротив, считается наиболее совершенной, однако данный вид впрыска является еще и самым сложным и дорогим в производстве и эксплуатации. Самой популярной и применяемой системой питания на территории РФ является распределенный впрыск топлива. По статистике, данный вид топливоподачи установлен на 62% всех бензиновых автомобилей. Популярность системы обусловлена ее невысокой стоимостью в производстве, эксплуатации и обслуживании. Кроме того, именно распределенный

впрыск топлива устанавливается на легковые автомобили экономкласса, самой популярной на российском автомобильном рынке ценовой категории до 1,2 млн руб.³

Таким образом, в настоящее время в России наиболее распространенным является легковой автомобиль с бензиновым ДВС с распределенным впрыском.

Первой и основной причиной неправильной работы электромагнитных форсунок являются разного рода отложения и повреждения, которые образуются вследствие использования некачественного топлива. Качество автомобильного бензина определяется ГОСТ 32513–2013. Согласно данному документу к топливу предъявляется ряд технических требований. К наиболее распространенным причинам по-

³ Какие ценовые сегменты самые популярные на российском авторынке [Электронный ресурс] / Аналитическое агентство «Автостат»: официальный сайт. – Режим доступа: <https://autostat.ru.turbopages.org/autostat.ru/s/infographics/42189/>

вреждения форсунок относятся: повышенное содержание смол, олефиновых и ароматических углеводородов, что является причиной образования отложений на соплах форсунок, а также наличие серы и сернистых соединений, что приводит к коррозии металлических деталей.

Некорректная работа электромагнитных топливных форсунок приводит к следующим последствиям: затруднению пуска ДВС, нестабильной работе ДВС на холостом ходу и в переходных режимах, пропуску воспламенений, детонации, потере мощности. В результате продолжительной работы ДВС с неисправными форсунками может произойти оплавление каталитического нейтрализатора, повреждение деталей цилиндропоршневой группы, увеличение расхода топлива, повышение токсичности отработавших газов.

Целью исследования является раннее выявление некорректной работы электромагнитных топливных форсунок за счет разработки мероприятий по организации самодиагностики их состояния электронным блоком управления ДВС.

В настоящий момент существует несколько общепризнанных методов диагностики и проверки работоспособности электромагнитных топливных форсунок. Они делятся на две основные группы по способу проведения: без демонтажа и с демонтажем. В рамках данного исследования интерес представляют способы, относящиеся к первой группе.

Наиболее перспективным методом, с точки зрения его реализации в системе самодиагностики ДВС, является контроль технического состояния форсунки по величине падения давления топлива во время впрыска [5, 6].

По результатам анализа современных исследований отечественных и зарубежных авторов в области функционирования электромагнитных форсунок установлено, что большинство работ посвящено дизельным двигателям с системой Common Rail [7, 8, 9, 10, 11, 12], дальнейшее увеличение давления впрыска требует поиска новых подходов к конструкции и управлению работой таких форсунок. Тренд на сокращение количества автомобилей с дизельными ДВС характерен не только для России, но и для большинства развитых стран мира, однако одним из перспективных направлений является использование дизеля на морских судах.

Среди исследований, посвященных бензиновым ДВС, большинство направлено на повышение экологичности их работы [13, 14].

Экологичность напрямую зависит от полноты сгорания топлива и точности его дозирования на различных режимах работы ДВС, поэтому важными аспектами является дисперсность распыла [15, 16], скорость испарения топлива [17, 18], образование топливовоздушной смеси [19, 20], форма факела [21]. Однако указанные работы не затрагивают вопросы безотказной работы форсунок, а также контроля их технического состояния.

В работе [22] представлена методика диагностирования форсунок, позволяющая определять фактический расход топлива каждой форсунки во время впрыска для более полного и чистого сгорания углеводородов, однако её практическое применение потребует использования дорогостоящего оборудования.

Таким образом, реализация метода самодиагностики электромагнитных форсунок по величине падения давления топлива во время впрыска является актуальной задачей, решение которой позволит предотвратить некорректную работу ДВС, снизить риск возникновения отказов, риск перерасхода топлива и образования вредных веществ в отработавших газах.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на физической модели, которая представляет собой упрощенную топливную систему с распределенным впрыском, установленную на бензиновые двигатели внутреннего сгорания. Основные элементы физической модели (рисунок 3): топливный насос 4 (на рисунке место присоединения), рампа 2, форсунка 3, датчик давления 1.

Управление работой форсунки осуществлялось при помощи контроллера на базе Arduino. В качестве объекта выбрана форсунка Bosch 0280 158 996, т.к. она и её модификации являются достаточно распространенными, в том числе на отечественных автомобилях. При проведении эксперимента следующие факторы приняты как постоянные: давление в топливной рампе – 3,5 бар, длительность управляющего сигнала на открытие форсунки – 30 м/с при скважности сигнала 25%. Переменным фактором является загрязненность распылителя форсунки – площадь проходного сечения сопла. Диапазон изменения параметра составил от 0% (полностью чистый распылитель) до 100% (полностью загрязненный) с шагом 25%. Загрязненность имитировалась запайкой распылительных отверстий (рисунок 4).

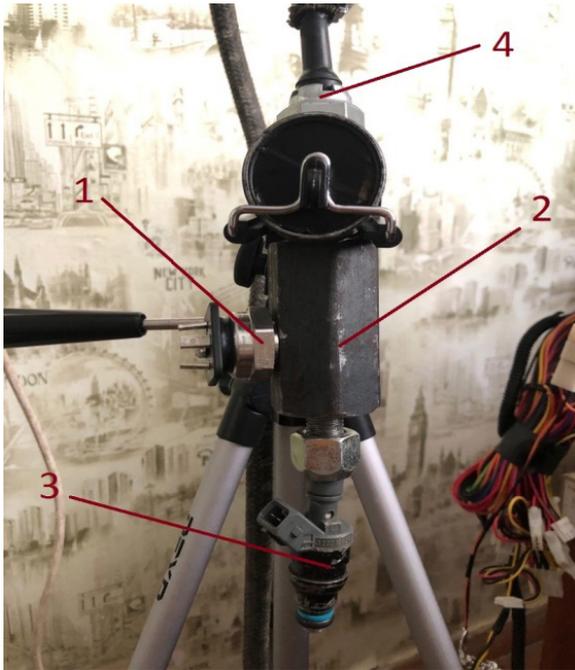


Рисунок 3 – Физическая модель топливной системы

Figure 3 – Physical model of the fuel system

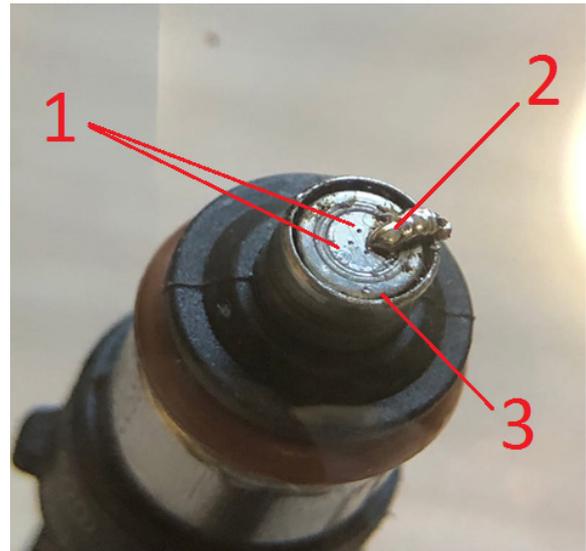


Рисунок 4 – Имитация загрязнения сопла распылителя
1 – сопла, 2 – капля припоя (имитация загрязнения),
3 – распылитель форсунки

Figure 4 – Simulating contamination of the atomiser nozzle
1 – nozzles, 2 – solder drop (simulated contamination),
3 – nozzle sprayer

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам эксперимента получено 25 графиков: 5 измерений для каждого уровня загрязненности от 0% до 100% с шагом 25%. При помощи датчика давления определено давление, соответствующее началу и завершению

впрыска топлива. Рассчитана разность давления в начале впрыска и давления в конце впрыска, т.е. перепад давления внутри форсунки, величина которого напрямую зависит от загрязненности сопла распылителя. Результаты представлены на рисунке 5.

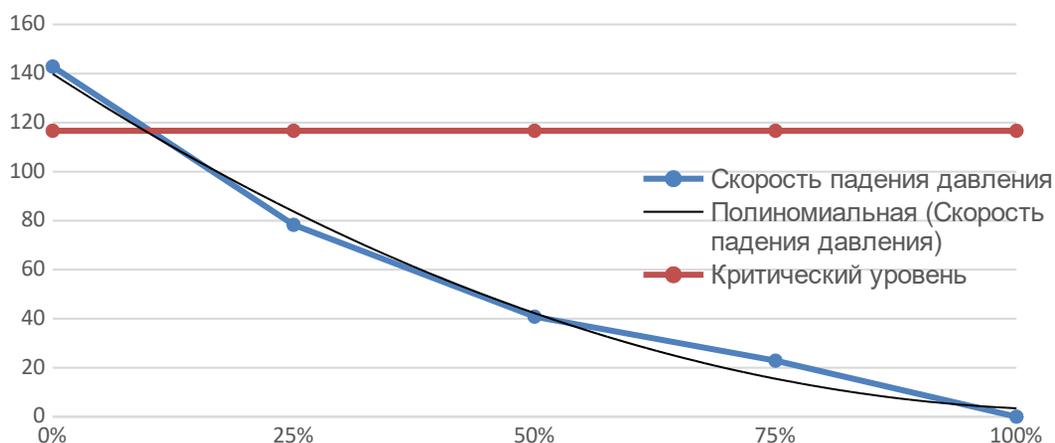


Рисунок 5 – Зависимость скорости падения давления топлива внутри форсунки от загрязненности сопла

Figure 5 – Dependence of fuel pressure drop rate inside the nozzle on the contamination of the nozzle

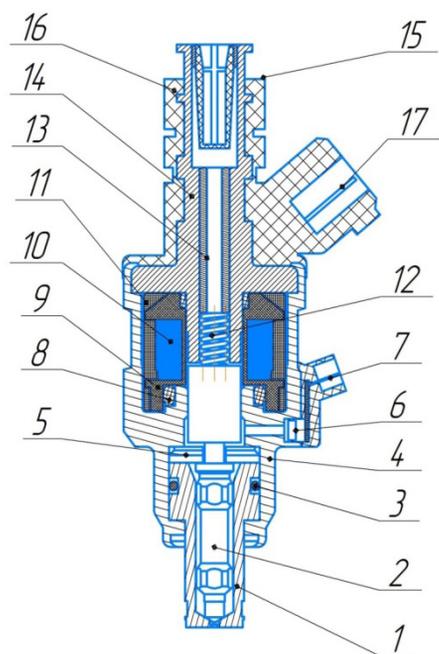


Рисунок 6 – Прототип топливной форсунки с встроенным датчиком давления:
 1 – распылитель, 2 – запорная игла, 3 – уплотнение распылителя, 4 – нижняя часть корпуса, 5 – седло иглы, 6 – датчик давления в сборе с платой, 7 – разъем датчика давления, 8 – уплотнение электромагнита, 9 – катушка электромагнита, 10 – обмотка электромагнита, 11 – оболочка электромагнита, 12 – возвратная пружина, 13 – опорная трубка, 14 – верхняя часть корпуса, 15 – пластиковая часть корпуса, 16 – фильтрующий элемент, 17 – разъем

Figure 6 – Prototype fuel injector with integrated pressure sensor:
 1 – atomizer, 2 – shut-off needle, 3 – atomizer seal, 4 – housing bottom, 5 – needle seat, 6 – pressure sensor assembly with board, 7 – pressure sensor connector, 8 – solenoid seal, 9 – solenoid coil, 10 – solenoid winding, 11 – solenoid shell, 12 – return spring, 13 – support tube, 14 – housing top, 15 – plastic housing part, 16 – filter element, 17 – connector

На представленном графике выделена линия критического уровня падения давления, характерная для показателя долгосрочной топливной коррекции в 10%. Данное значение является предельно нормальным для корректной работы двигателя⁴. Критический уровень может быть использован в качестве допусти-

мого норматива при эксплуатации электромагнитных форсунок.

Для проведения диагностики состояния форсунок необходимо постоянно проводить измерения скорости падения давления топлива, для этого целесообразно дооснастить топливную систему датчиками давления. Одним из перспективных вариантов может стать разработка конструкции форсунки с встроенным датчиком давления (рисунок 6).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки показаний датчиков давления необходим электронный блок управления, который будет анализировать входные данные и информировать водителя о необходимости проведения процедуры обслуживания или замены топливных форсунок. Варианты реализации могут быть различны: это может быть самостоятельное устройство, которое будет работать совместно с блоком управления двигателем. Однако более перспективным вариантом является интеграция алгоритма проверки форсунок в стандартную прошивку блока управления двигателем.

Алгоритм проверки форсунок может быть следующим: на холостом ходу ДВС блок управления через датчики давления определяет скорость падения давления топлива в форсунках за определенное количество циклов, рассчитывает среднее значение и сравнивает с допустимым нормативом (критический уровень). В случае, если форсунки работают некорректно – блок управления выдает ошибку и загорается лампа проверки двигателя Check Engine. Похожие алгоритмы успешно реализованы при управлении бензиновыми ДВС [23].

Полученная зависимость скорости падения давления топлива в форсунке во время впрыска в зависимости от её загрязненности качественно совпадает с зависимостями, полученными другими авторами при разработке методов диагностирования как бензиновых [5, 6, 24], так и дизельных ДВС [25].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Основной причиной выхода из строя электромагнитных топливных форсунок является качество топлива, несоответствующее ГОСТу. При выходе из строя форсунок изменяются экономические, экологические, а также эксплуатационные показатели автомобиля.

⁴ Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. Москва : ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. – 432 с. ISBN:5-9698-0025-2

2. Определены основные факторы и пределы их значений, создана и описана физическая модель, представляющая собой уменьшенную версию топливной системы автомобиля. На основании экспериментальных данных получена зависимость падения давления от загрязненности распылителя форсунки.

3. Построен график зависимости скорости изменения давления топлива от загрязненности распылителя, на котором выделено критическое значение, характерное для показателя долгосрочной топливной коррекции в 10%. Предложен возможный вариант алгоритма работы электронного блока управления. Одним из таких вариантов является конструкторская разработка – форсунка со встроенным датчиком давления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мальцев Д.В., Пестриков С.А., Утробин В.Ю. Влияние условий эксплуатации на надежность грузовых автомобилей на базе шасси КамАЗ // Химия. Экология. Урбанистика. 2019. Т2. С. 129–133.
2. Шаихов Р.Ф. Анализ показателей надежности коробок отбора мощности грузовых автомобилей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 67–73.
3. Шаихов Р.Ф. Определение остаточного ресурса деталей навесного оборудования специальных автомобилей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 3. С. 83–88.
4. Шаихов Р.Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. №3. С. 89–95.
5. Васильев А.В., Березюков Д.С. Совершенствование диагностирования электромагнитных форсунок бензиновых двигателей на основе оценки их динамической производительности // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2012. № 6. С. 11–15.
6. Васильев А.В., Березюков Д.С. Совершенствование диагностики топливных форсунок поршневых двигателей с распределенным впрыском топлива // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 8(81). С. 20–23.
7. Jin, Y., Qiao, X., Gu, C., Guo, H., & Ning, C. A method for fault diagnosis of fuel injector of diesel engine based on res-CNN and fuel pressure wave. Qiche Gongcheng/Automotive Engineering. 2021. 43(6). pp. 943-951. doi:10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.019
8. Wang, J. -, Wang, Z. -, Ma, X. -, & Yuan, Z. Decoupling and diagnosis of multi-fault of diesel engine fuel system. Kongzhi Yu Juece/Control and Decision. 2019. 34(10). pp. 2249-2255. doi:10.13195/j.kzjyc.2018.0264
9. Gong, W., Chen, H., Zhang, M., & Zhang, Z. Intelligent diagnosis method for incipient fault of motor bearing based on deep learning. Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument. 2020. 41(1). pp. 195-205. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J1905073
10. Stoeck, T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. Diagnostyka. 2021. 22(2). pp. 47-52. doi:10.29354/DIAG/135999
11. Kluczyk, M., & Grządziela, A. Vibration diagnostics of common rail injectors. Journal of Marine Engineering and Technology. 2021. 16(4). pp. 177-184. doi:10.1080/20464177.2017.1387088
12. Stoeck, T., Osipowicz, T., & Abramek, K. F. Methodology for the repair of denso common rail solenoid injectors. [Metodyka naprawy wtryskiwaczy elektromagnetycznych układów zasilania Common Rail Denso] Eksploatacja i Niezawodnosc. 2014. 16(2). pp. 270-275
13. Sarwar, A., Sankavaram, C., & Lu, X. Diagnosis and prognosis of fuel injectors based on control adaptation. Paper presented at the Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM. 2017. pp. 467-476.
14. Mohapatra, C. K., Schmidt, D. P., Sforzo, B. A., Matusik, K. E., Yue, Z., Powell, C. F., Martínez, M. Collaborative investigation of the internal flow and near-nozzle flow of an eight-hole gasoline injector (engine combustion network spray G). International Journal of Engine Research. 2020 doi:10.1177/1468087420918449
15. Medina, M., Fatouraie, M., & Wooldridge, M. High-speed imaging studies of gasoline fuel sprays at fuel injection pressures from 300 to 1500 bar. SAE Technical Papers. 2018-April doi:10.4271/2018-01-0294
16. Ishima, T., Sukena, R., Obokata, T., Kawachi, K., & Kobayashi, K. Study on diagnostic methods to evaluate the relationship between fuel injection pattern and spray characteristics at the swirl nozzle injector. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2003. Part B, 69(678). pp. 504-511. doi:10.1299/kikaib.69.504
17. Dong, X., Yang, J., Hung, D. L. S., Li, X., & Xu, M. Effects of flash boiling injection on in-cylinder spray, mixing and combustion of a spark-ignition direct-injection engine. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. 37(4). pp. 4921-4928. doi:10.1016/j.proci.2018.09.014
18. Hwang, J., Weiss, L., Karathanassis, I. K., Koukouvini, P., Pickett, L. M., & Skeen, S. A. Spatio-temporal identification of plume dynamics by 3D computed tomography using engine combustion network spray G injector and various fuels. Fuel. 2020. 280 doi:10.1016/j.fuel.2020.118359
19. Yang, J., Xu, M., Hung, D. L. S., Wu, Q., & Dong, X. Influence of swirl ratio on fuel distribution and cyclic variation under flash boiling conditions in a spark ignition direct injection gasoline engine. Energy Conversion and Management. 2017. 138. pp. 565-576. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.024

20. Costa, M., Sorge, U., Merola, S., Irimescu, A., La Villetta, M., & Rocco, V. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission. *Energy*. 2016. 117. pp. 405-415. doi:10.1016/j.energy.2016.03.065
21. Mohan, B., Du, J., Sim, J., & Roberts, W. L. Hydraulic characterization of high-pressure gasoline multi-hole injector. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018. 64. pp. 133-141. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.017
22. Cavicchi, A., Sparacino, S., Berni, F., Postriotti, L., & Fontanesi, S. Evaluation of the single jet flow rate for a multi-hole GDI nozzle. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. 2019. 2191 doi:10.1063/1.5138776
23. Gritsenko, A., Shepelev, V., Zadorozhnaya, E., & Shubenkova, K. Test diagnostics of engine systems in passenger cars. *FME Transactions*. 2020. 48(1). pp. 46-52. doi:10.5937/fmet2001046G
24. Овчинников Г.В., Козлов С.А. Влияние загрязнений электромагнитных форсунок на их показатели // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 4. С. 45–46.
25. Макушев Ю.П., Филатов А.В., Михайлова Л.Ю. Методика диагностики топливной аппаратуры дизеля по изменению давления на входе в форсунку и движения иглы // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2012. Т.1. С. 347–354.
1. Mal'cev D.V., Pestrikov S.A., Utrobin V.YU. Vliyaniye usloviy ekspluatsii na nadezhnost' gruzovykh avtomobilej na baze shassi KamAZ [The influence of operating conditions on the reliability of trucks based on the KAMAZ chassis]. *Chemistry. Ecology. Urban studies*, 2019, 2: 129-133 (In Russian)
2. SHaihov R.F. Analiz pokazatelej nadezhnosti korobok otbora moshchnosti gruzovykh avtomobilej [Analysis of reliability indicators of power take-off boxes of trucks]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 4: 67-73 (In Russian)
3. SHaihov R.F. Opredelenie ostatochnogo resursa detalej navesnogo oborudovaniya special'nykh avtomobilej [Determination of the residual life of the parts of the attachments of special vehicles]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 3: 83-88 (In Russian)
4. SHaihov R.F. Kontrol' proizvodstvennogo personala na avtotransportnom predpriyatii [Control of production personnel at a motor transport enterprise]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, 3: 89-95 (In Russian)
5. Vasil'ev A. V., Berezyukov D. S. Sovershenstvovanie diagnostirovaniya elektromagnitnykh forsunok benzinovykh dvigatelej na osnove ocenki ih dinamicheskoy proizvoditel'nosti [Improving the diagnosis of electromagnetic injectors of gasoline engines based on the assessment of their dynamic performance]. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 10: Innovative activity*, 2012, 6: 11-15 (In Russian)
6. Vasil'ev A. V., Berezyukov D. S. Sovershenstvovanie diagnostiki toplivnykh forsunok porshnevnykh dvigatelej s raspredelennym vpryskom topliva [Improvement of diagnostics of fuel injectors of piston engines with distributed fuel injection]. *Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2011, 8(81): 20-23 (In Russian)
7. Jin, Y., Qiao, X., Gu, C., Guo, H., & Ning, C. A method for fault diagnosis of fuel injector of diesel engine based on res-CNN and fuel pressure wave // *Qiche Gongcheng/Automotive Engineering*. 2021, 43(6): 943-951. doi:10.19562/j.chinasae.qcgc.2021.06.019
8. Wang, J. -, Wang, Z. -, Ma, X. -, & Yuan, Z. Decoupling and diagnosis of multi-fault of diesel engine fuel system // *Kongzhi Yu Juece/Control and Decision*. 2019, 34(10), pp. 2249-2255. doi:10.13195/j.kzyjc.2018.026
9. Gong, W., Chen, H., Zhang, M., & Zhang, Z. Intelligent diagnosis method for incipient fault of motor bearing based on deep learning // *Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2020, 41(1): 195-205. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J1905073
10. Stoeck, T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases // *Diagnostyka*. 2021, 22(2): 47-52. doi:10.29354/DIAG/135999
11. Kluczyk, M., & Grządziela, A. Vibration diagnostics of common rail injectors // *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2021, 16(4): 177-184. doi:10.1080/20464177.2017.1387088 (In Eng.)
12. Stoeck, T., Osipowicz, T., & Abramek, K. F. Methodology for the repair of denso common rail solenoid injectors. [Metodyka naprawy wtryskiwaczy elektromagnetycznych układów zasilania Common Rail Denso] *Eksploracja i Niezawodność*. 2014, 16(2): 270-275
13. Sarwar, A., Sankavaram, C., & Lu, X. Diagnosis and prognosis of fuel injectors based on control adaptation // *Paper presented at the Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHM*. 2017: 467-476
14. Mohapatra, C. K., Schmidt, D. P., Sforzo, B. A., Matusik, K. E., Yue, Z., Powell, C. F., Martínez, M. Collaborative investigation of the internal flow and near-nozzle flow of an eight-hole gasoline injector (engine combustion network spray G) // *International Journal of Engine Research*. 2020 doi:10.1177/1468087420918449
15. Medina, M., Fatouraie, M., & Wooldridge, M. High-speed imaging studies of gasoline fuel sprays at fuel injection pressures from 300 to 1500 bar // *SAE Technical Papers*. 2018-April doi:10.4271/2018-01-0294
16. Ishima, T., Sukena, R., Obokata, T., Kawachi, K., & Kobayashi, K. Study on diagnostic methods to evaluate the relationship between fuel injection pattern and spray characteristics at the swirl nozzle injector // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. 2003, Part B, 69(678), pp. 504-511. doi:10.1299/kikaib.69.504
17. Dong, X., Yang, J., Hung, D. L. S., Li, X., & Xu, M. Effects of flash boiling injection on in-cylinder

spray, mixing and combustion of a spark-ignition direct-injection engine // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019, 37(4), pp. 4921-4928. doi:10.1016/j.proci.2018.09.014

18. Hwang, J., Weiss, L., Karathanassis, I. K., Koukouvinis, P., Pickett, L. M., & Skeen, S. A. Spatio-temporal identification of plume dynamics by 3D computed tomography using engine combustion network spray G injector and various fuels // *Fuel*. 2020, 280 doi:10.1016/j.fuel.2020.118359

19. Yang, J., Xu, M., Hung, D. L. S., Wu, Q., & Dong, X. Influence of swirl ratio on fuel distribution and cyclic variation under flash boiling conditions in a spark ignition direct injection gasoline engine // *Energy Conversion and Management*. 2017, 138, pp. 565-576. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.024

20. Costa, M., Sorge, U., Merola, S., Irimescu, A., La Villetta, M., & Rocco, V. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission // *Energy*. 2016, 117, pp. 405-415. doi:10.1016/j.energy.2016.03.065

21. Mohan, B., Du, J., Sim, J., & Roberts, W. L. Hydraulic characterization of high-pressure gasoline multi-hole injector // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018, 64, pp. 133-141. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.017

22. Cavicchi, A., Sparacino, S., Berni, F., Postriti, L., & Fontanesi, S. Evaluation of the single jet flow rate for a multi-hole GDI nozzle // *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*. 2019, 2191 doi:10.1063/1.5138776

23. Gritsenko, A., Shepelev, V., Zadorozhnaya, E., & Shubenkova, K. Test diagnostics of engine systems in passenger cars // *FME Transactions*. 2020, 48(1), pp. 46-52. doi:10.5937/fmet2001046G

24. Ovchinnikov G.V., Kozlov S.A. Vliyanie zagryaznenij elektromagnitnyh forsunok na ih pokazateli [The influence of contamination of electromagnetic injectors on their performance]. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2007, 4: 45-46 (In Russian)

25. Makushev, YU. P., Filatov A. V., Mihajlova L. YU. Metodika diagnostiki toplivnoj apparatury dizelya po izmeneniyu davleniya na vhode v forsunku i dvizheniya igly [The method of diagnostics of diesel fuel equipment by changing the pressure at the inlet to the nozzle and the movement of the needle]. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2012, 1: 347-354 (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Вотинов Г.Н. Разработка физической модели топливной системы автомобиля, проведение экспериментальных исследований и статистическая обработка данных.

Мальцев Д.В. Постановка цели и задач исследования, разработка прототипа топливной форсунки с встроенным датчиком давления.

Репецкий Д.С. Анализ ранее выполненных работ по тематике исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Georgij N. Votinov Development of a physical model of the fuel system of the car, conducting experimental studies and statistical data processing.

Dmitry V. Maltsev Setting the goals and objectives of the study, developing a prototype of a fuel injector with a built-in pressure sensor.

Dmitry S. Repetsky Analysis of previously performed works on the subject of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вотинов Георгий Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доц., SPIN-код: 3870-1069; AuthorID: 112901; доц. кафедры «Общая физика».

Мальцев Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доц., Scopus ID 57212413474, SPIN-код: 5484-9395; AuthorID: 659132; доц. кафедры «Автомобили и технологические машины».

Репецкий Дмитрий Станиславович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и технологические машины».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgij N. Votinov – Cand. of Sci., Associate Professor, SPIN-код: 3870-1069; AuthorID: 112901;; Associate Professor of the General Physics Department.

Dmitry V. Maltsev – Cand. of Sci., Associate Professor, Scopus ID 57212413474, SPIN-code: 5484-9395; AuthorID: 659132; Associate Professor of the Cars and Technological Machines Department.

Dmitry S. Repetsky – Cand. of Sci., Associate Professor of the Cars and Technological Machines Department.

Научная статья

УДК 629.113

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>

ИЗМЕНЕНИЕ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ ДОБАВЛЕНИИ В НЕГО РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА

С.Н. Кривцов, Т. И. Кривцова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
krivcov_sergei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>
tatyana_krivcova1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9425-2062>

АННОТАЦИЯ

Введение. Экологическая безопасность автомобилей с дизельным двигателем не теряет своей актуальности. В условиях ужесточения требований к дизельному топливу содержание многих вредных выбросов в отработавших газах, в том числе серы, не допускается. Как известно, малосернистые топлива требуют наличия присадок, улучшающих смазывающие свойства дизельного топлива. Несоответствие требованиям по смазывающим свойствам значительно влияет на ресурс топливopодающей системы дизельного двигателя, прежде всего системы Common Rail. В связи с перечисленными выше обстоятельствами выдвинута гипотеза о том, что растительное масло в небольших концентрациях может служить для улучшения смазывающих свойств топлив.

Материалы и методы. В своих исследованиях авторы провели эксперименты по стандартной методике HFRR (высокочастотного поступательного движения шарика, трущегося по пластине в топливе). Для визуальной оценки пятен износа и измерения их размеров применяли микроскоп. В качестве образцов для экспериментов брали дизельное топливо и в определенных пропорциях добавляли к нему растительное масло в качестве присадки.

Обсуждение и заключение. Добавка растительного масла способна улучшать смазывающие свойства дизельного топлива, даже не соответствующего ГОСТу по этому параметру. Проведенные эксперименты позволяют заключить, что добавление растительного масла в процентном отношении к дизельному топливу практически линейно снижает диаметр пятна износа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смазывающие свойства, дизельное топливо, растительное масло, топливopодающая система, пятно износа, трение, абразивный износ, добавки к дизельному топливу, снижение износа

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 11.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Кривцов С.Н., Кривцова Т.И. Изменение смазывающих свойств дизельного топлива при добавлении в него растительного масла // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т.18, № 5(81). С. 534-543. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>

© Кривцов С.Н., Кривцова Т. И., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>

CHANGING THE LUBRICITY OF DIESEL FUEL WITH VEGETABLE OIL ADDITIVE

Sergey N. Krivtsov, Tatyana I. Krivtsova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

krivcov_sergei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>

tatyana_krivcova1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9425-2062>

ABSTRACT

Intriduction. *The environmental safety of cars with a diesel engine does not lose its relevance. In the conditions of stricter requirements for diesel fuel, the content of many substances harmful to the environment, including sulfur, is not allowed. As is known, low-sulfur fuels require the presence of additives that improve the lubricating properties of diesel fuel. Non-compliance with the requirements for lubricity significantly affects the resource of the fuel supply system of a diesel engine, primarily the Common Rail system. In order with the circumstances listed above, we hypothesized that vegetable oil can serve in small concentrations to improve the lubricating properties of fuels.*

Materials and methods. *In our research, we conducted experiments using the standard HFRR method (high-frequency translational motion of a ball rubbing against a plate in fuel). A microscope was used to visually assess the wear spots and measure their size. Diesel fuel was taken as samples for experiments and vegetable oil was added to it as an additive in certain proportions.*

Discussion and conclusions. *The vegetable oil additive can improve the lubricity of diesel fuel, even if it does not comply with GOST for this parameter. The experiments conducted allow us to conclude that the vegetable oil additive as a percentage of diesel fuel almost linearly reduces the diameter of the wear spot*

KEYWORDS: *lubricity, diesel fuel, vegetable oil, diesel fuel additive, wear spot, friction, abrasive wear, decreasing of wear*

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 11.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Krivtsov S.N., Krivtsova T.I. Changing the lubricity of diesel fuel with vegetable oil additive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 534-543. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>*

© Krivtsov S.N., Krivtsova T.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие страны Евросоюза, Япония, Китай и др. озабочены проблемой сокращения выбросов диоксида углерода в атмосферу. Считается, что наибольший эффект может быть достигнут при использовании транспортных средств с нулевыми выбросами CO₂, например, электромобилей. Но в настоящее время для полного отказа от двигателей внутреннего сгорания не хватает энергетических мощностей и широко развитой инфраструктуры.

Одним из самых экономичных агрегатов для решения широкого спектра задач остается дизельный двигатель. У него самые низкие выбросы диоксида углерода из всех ДВС, работающих на жидких топливах. Для ряда отраслей экономики он и вовсе является пока практически безальтернативной силовой установкой. В настоящее время все более остро встает вопрос о повышении их экологической безопасности, снижении дымности и токсичности отработавших газов дизельных двигателей, в связи с чем требования к качеству дизельных топлив постоянно ужесточаются.

Одним из общепризнанных путей по снижению экологической нагрузки дизелей на окружающую среду является применение нетрадиционных моторных топлив, в том числе природного происхождения, например, растительных масел и их производных [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Подобные присадки востребованы во многих отраслях промышленности [13, 14, 15]. Однако здесь возникают трудности, препятствующие их широкому применению в больших концентрациях: высокая стоимость с одной стороны, плохие низкотемпературные свойства и сниженное цетановое число с другой стороны.

К дизельным топливам также предъявляются высокие требования в плане экологичности и, прежде всего, к содержанию в нем серы. При этом малосернистые топлива должны содержать присадки, улучшающие смазывающие свойства [16, 17].

Однако некоторые исследователи отмечают, что показатели качества на разных АЗС могут варьироваться [18, 19]. В частности, несоответствие требованиям по смазывающим свойствам значительно влияет на ресурс то-

пливоподающей системы дизельного двигателя, прежде всего системы Common Rail [20, 21]. Этот факт приводит к ухудшению экологических показателей двигателей, а также повышенным затратам на эксплуатацию.

В связи с перечисленными выше обстоятельствами нами выдвинута гипотеза о том, что растительное масло в небольших концентрациях может улучшить смазывающие свойства топлив. Попытки применения масел в качестве добавки для улучшения смазывающих свойств уже делались [22, 23], однако в этих работах применялись оригинальные методики, а не стандартные по ГОСТ ISO 12156-1–2012. Во многих исследованиях отмечается положительное влияние эфиров растительных масел на смазывающие свойства [1, 2, 3, 4, 7], но высокая цена и ограниченное распространение эфиров менее привлекательны для условий рядовой эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Смазывающие свойства дизельных топлив чаще всего определяются методом HFRR¹ (высокочастотного поступательного движения шарика, трущегося по пластине в топливе).

Для проведения экспериментальных исследований были заготовлены реактивы – летнее дизельное топливо и растительное подсолнечное масло. Дизельное топливо было куплено на рядовой заправке. Фракционный состав дизельного топлива и соответствие ГОСТу² заранее не проверялись. Подсолнечное рафинированное масло приобрели в ближайшем супермаркете. Физико-химические свойства масла не проверялись заранее.

В экспериментах участвовало 6 проб топлив (таблица 1) с объемным содержанием 0–25% растительного масла в смеси. Этот предел изменения концентрации масла выбран потому, что дальнейшее увеличение содержания масла значительно влияет на рабочий процесс двигателя, а именно на экономичность и жесткость работы [24].

В топливо (смесь) при испытаниях погружались специально подготовленные пластины, отполированные «до зеркала»; всего 3 шт. с двухсторонней обработкой. Также были необходимы металлические шарики в количестве 6 шт. Диаметр шариков 6 мм.

¹ ГОСТ ISO 12156-1–2012. Межгосударственный стандарт. Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Часть 1. Метод испытаний. Дата введения: 2014-07-01.

² ГОСТ 305–2013. Межгосударственный стандарт. Топливо дизельное. Технические условия. Дата введения: 2015-01-01.

Таблица 1
Образцы смесей дизельного топлива с растительным маслом

Table 1
Samples of diesel fuel mixtures with vegetable oil

	Количество дизельного топлива		Количество растительного масла		Общий объем смеси
	%	мл	%	мл	
Образец 1	100	20	0	0	20
Образец 2	95	19	5	1	20
Образец 3	90	18	10	2	20
Образец 4	85	17	15	3	20
Образец 5	80	16	20	4	20
Образец 6	75	15	25	5	20

Для обработки поверхностей до и после испытаний был использован обезжириватель.

Топливо для исследования перед загрузкой в установку отмерялось посредством медицинского стерильного шприца.

Залитое в установку топливо предварительно нагревалось до рабочей температуры 60 °С. Данная температура поддерживалась для каждой пробы топлива на протяжении всего исследования.

Процесс возвратно-поступательного движения высокой частоты шарика (50 Гц, амплитуда 1 мм) по пластинке, находящейся на дне ванны установки с топливом, длился согласно ГОСТу 75 мин на каждый опыт. По истечении времени производилась замена топлива на другую пробу, менялась пара шарик-пластинка.

Шарик и пластинка после обработки обезжиривателем маркировались, упаковывались отдельно и транспортировались в лабораторию для изучения пятен износа под микроскопом.

Для визуальной оценки пятен износа и измерения их размеров необходим микроскоп. В данной ВКР был использован микроскоп TourCam (рисунок 1) с цифровой камерой UCМOS09000КРВ. Максимальное разрешение камеры 3488 x 2616 (примерно 9,000,000 пикселей). Размер пикселя всего 1,67µm x 1,67µm (1,67 мкм x 1,67 мкм) и высокая чувствительность позволяет рассмотреть пятна износа в детальных подробностях.



Рисунок 1 – Цифровой микроскоп TourCam

Figure 1 – TourCam digital microscope

Камера имеет USB-интерфейс, который подключается к персональному компьютеру (ПК). Для просмотра цифрового изображения с камеры на ПК установлено специализированное программное обеспечение TourView.

Обычно пятно износа представляет собой серию царапин, образовавшихся по направлению движения шарика, которые больше по направлению оси абсцисс, чем по оси ординат.

В некоторых случаях, например, когда проводят испытания эталонных жидкостей с низкой смазывающей способностью, граница между пятном износа и обесцвеченной (но без износа) площадью шарика отчетлива, и размер пятна легко измерить. В других случаях центральная поцарапанная часть пятна окружена менее четкой площадью износа и между площадями с износом и без износа на шарике нет резкой границы. В этих случаях, возможно, будет трудно увидеть или измерить форму пятна, как показано на рисунке 2. Полное пятно износа включает отчетливую и менее отчетливую площадь.

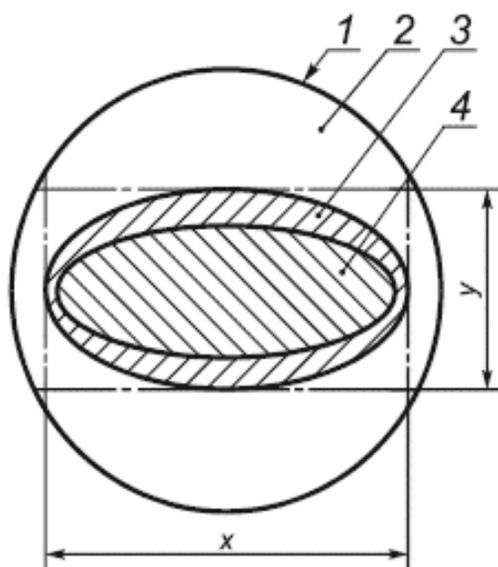


Рисунок 2 – Пример рисунка пятна износа с неясно выраженной границей износа:
 1 – шарик; 2 – поверхность, не подвергшаяся износу;
 3 – неясно выраженная часть пятна износа;
 4 – ясно выраженная часть пятна износа

Figure 2 – Example of a wear spot pattern with an unclear indistinct wear boundary:
 1 – ball; 2 – surface not subjected to wear;
 3 – vaguely expressed part of the wear spot;
 4 – clearly expressed part of the wear spot

Некоррелированный средний диаметр пятна износа MWSD, мкм, рассчитывают по формуле

$$MWSD = \frac{x + y}{2},$$

где x – размер пятна износа, перпендикулярный к направлению возвратно-поступательного движения, мкм;

y – размер пятна износа, параллельный направлению возвратно-поступательного движения, мкм.

В дальнейшем диаметр пятна износа корректировался в соответствии с требованиями ГОСТа с учетом абсолютного давления насыщенных паров, влажности и температуры окружающего воздуха в момент начала и конца испытания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 представлены изображения пятен износа шариков (фотографии), полученные при помощи цифрового микроскопа TourCam. Для удобства на рисунках сразу нанесены размеры этих пятен.

Расчет скорректированного диаметра пятна износа первого шарика производился с учетом ниже приведенных данных.

Были зафиксированы следующие корректирующие характеристики: температура окружающего воздуха $T = 23,5$ °C, влажность $RH = 43\%$.

Некоррелированный средний диаметр пятна износа MWSD

$$MWSD = \frac{602,9 + 580,3}{2} = 591,6 \text{ мкм};$$

$$v = 8,017352 - \frac{1705,984}{231,864 + 23,5} = 1,337.$$

Абсолютное давление насыщенных паров в начале (конце) испытания

$$AVP_1 = \frac{43 \cdot 10^{1,337}}{750} = 1,245.$$

Поправочный коэффициент влажности HCF примем равным 60.

$$WS_{1,4} = 591,6 + 60 \cdot (1,4 - 1,245) = 600,9 \text{ мкм}.$$

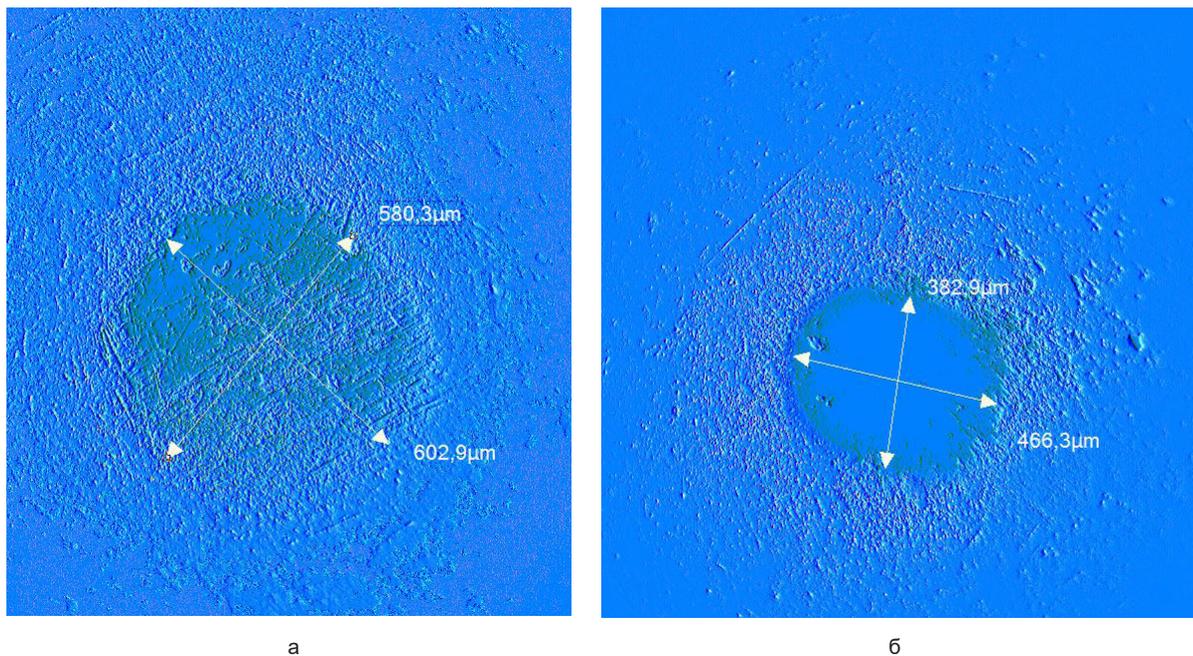


Рисунок 3 – Пятно износа шарика в чистом дизельном топливе без добавок (а) и с добавкой 10% по объему растительного масла (б)

Figure 3 – Ball wear spot in clean diesel fuel without additives (a) and with 10% by volume of vegetable oil added (b)

В процессе проведения анализа шариков под микроскопом температура окружающего воздуха и влажность не изменялись.

Расчёты для других шариков абсолютно аналогичны. Результаты расчётов сведём в таблицу 2.

Таблица 2
Результаты измерения пятен износа и расчётов скорректированных значений диаметров пятен

Table 2
Results of wear spot measurements and calculations of corrected wear spot diameters spot diameters

№	Масло, %	x, мкм	y, мкм	MWSD, мкм	RH1= RH2, %	T1= T2, °C	v	AVP1= AVP2	WS1,4, мкм
1	0	602,9	580,3	591,6	43	23,5	1,337	1,245	600,90
2	5	495,7	485,1	490,4	43	23,5	1,337	1,245	499,70
3	10	466,3	382,9	424,6	43	23,5	1,337	1,245	433,90
4	15	358,1	298,6	328,35	43	23,5	1,337	1,245	337,65
5	20	345,6	325,8	335,7	43	23,5	1,337	1,245	345,00
6	25	288,2	163,4	225,8	43	23,5	1,337	1,245	235,10

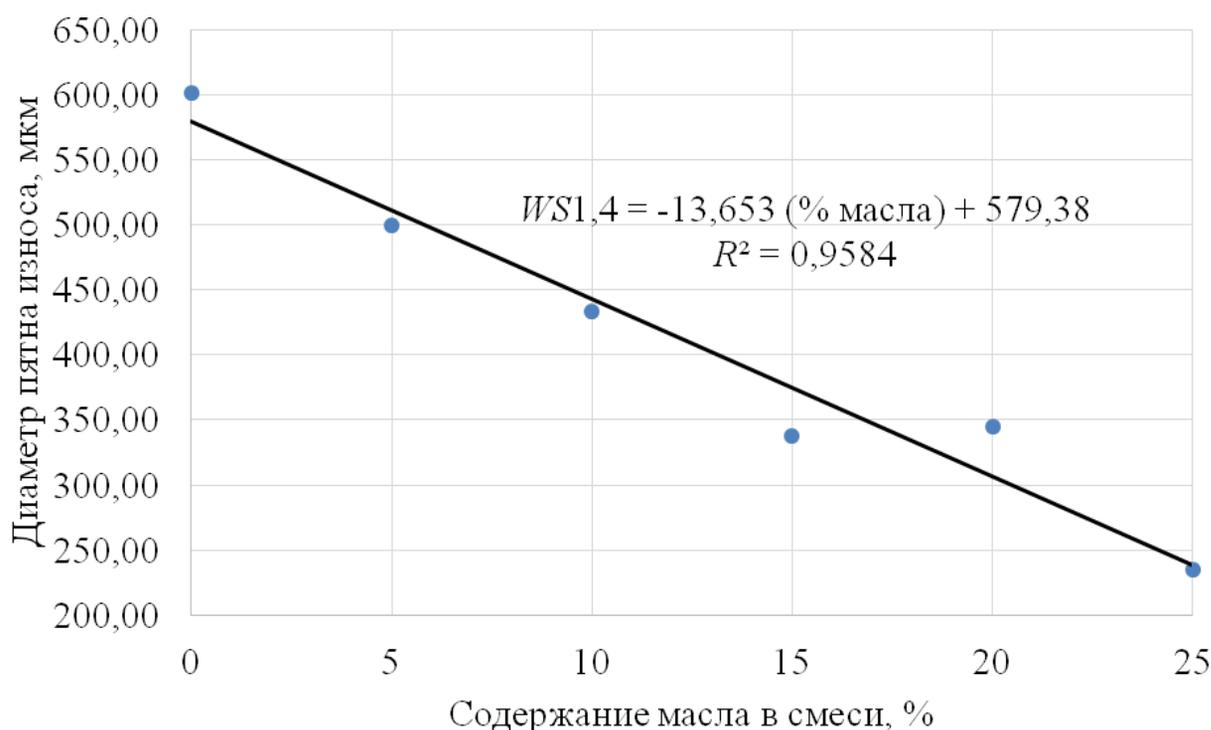


Рисунок 4 – График зависимости диаметра пятна износа шарика от содержания масла в дизельном топливе

Figure 4 – Ball wear spot diameter graph on oil content in diesel fuel

По результатам расчётов представим график зависимости диаметра пятна износа шарика от содержания масла в дизельном топливе (рисунок 4). На графике разместим линейное уравнение линии тренда и коэффициент достоверности аппроксимации R^2 .

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Качество дизельного топлива, реализуемого на АЗС, может не соответствовать требованиям по параметру смазывающих свойств, в частности, у опытного образца диаметр пятна износа шарика больше в 1,3 раза, чем установлено ГОСТ ISO 12156-1–2012.

2. Добавка растительного масла способна улучшать смазывающие свойства дизельного топлива, даже не соответствующего ГОСТу по этому параметру.

3. Проведенные эксперименты позволяют заключить, что добавление растительного масла в процентном отношении δ к дизельному топливу практически линейно снижает

диаметр пятна износа. Получено уравнение искомой зависимости

$$WS = - 13,653 \cdot \delta + 579,38 (R^2 = 0,96).$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пэн Дэсин. Биодизель для улучшения смазывающих свойств дизельных топлив с низким содержанием серы // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 6 (598). С. 46–48.
2. Шевченко Е.Б. Биодизель как присадка к дизельному топливу // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. № 3. С. 28–30.
3. Хайрудинов И.Р., Жирнов Б.С., Сидрачева И.И. Исследование свойств эфиров рапсового масла и их смесей с малосернистым дизельным топливом // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2011. № 1. С. 43–45.
4. Elbashir N, Ahmed WJ, Alrachid A, Mohammed N, Elwahsh M. (2016). Role of Biodiesel in the Enhancement of GTL Diesel Fuel Properties. Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings

2016: EESP2727 <http://dx.doi.org/10.5339/qfarc.2016.EESP2727>.

5. Chalita Kaewbuddee, Ekarong Sukjit, Jiraphon Srisertpol, Somkiat Maithomklang, Khatha Wathakit, Niti Klunkaew, Pansa Liplap and Weerachai Arjhan Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines *Energies* 2020, 13, 2823; doi:10.3390/en13112823

6. Ekarong Sukjit, Karl D Dearn and Athanasios Tsolakis Interrogating the Surface: The Effect of Blended Diesel Fuels on Lubricity *SAE Int. J. Fuels Lubr. | Volume 5 | Issue 1 (January 2012)*

7. Knothe G., ““Designer” Biodiesel: Optimizing fatty ester composition to improve fuel properties”, *Energ Fuel* 22 (2008) 1358-1364.

8. Lehto, K., Vepsäläinen, A., Kiiski, U., and Kuronen, M., “Diesel Fuel Lubricity Comparisons with HFRR and Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator Methods,” *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 7(3):842-848, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-2761>.

9. Перекрестов А.П., Клыкканова А.А. Улучшение смазочной способности экологически чистого дизельного топлива с помощью магнитно-мицеллярной противозносной присадки // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2012. № 5. С. 5–7.

10. Кондрашева Н.К., Еремеева А.М. Изучение влияния присадок и добавок на эксплуатационные и экологические характеристики дизельного топлива // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2017. № 38 (64). С. 86–89.

11. Кашапова А.А. Исследование смазывающей способности дизельного топлива // *Форум молодых ученых*. 2017. № 8 (12). С. 135–137.

12. Исследование влияния длительного хранения дизельного топлива на эксплуатационные характеристики / Нурмухаметова Э.Р., Фатхутдинова Э.Н., Сидоров Г.М., Осипенко Д.Ф. // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 9. С. 88–92.

13. Надежкин А.В., Лыу К.Х. Анализ методов улучшения смазывающей способности малосернистых судовых дистиллятных топлив // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2015. № 4. С. 117–121.

14. Получение присадок для дизельного топлива, используемого в сельском хозяйстве / Романцова С.В., Алибаев Б.Т., Корнев А.Ю., Нагорнов С.А. // *Наука в центральной России*. 2017. № 1 (25). С. 54–62.

15. Синтез противозносных компонентов топлив из возобновляемого сырья / Корнев А.Ю., Романцова С.В., Нагорнов С.А., Алибаев Б.Т. // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. № 1 (22). С. 170–175.

16. Разработка метода синтеза полифункциональной присадки к дизельному топливу на основе производных карбоновых кислот и исследование эффективности ее действия / Ахметов А.Ф. [и др.] // *Нефтегазовое дело*. 2021. № 3. С. 110–123.

17. Применение полиненасыщенных жирных кислот для улучшения противозносных свойств

топлив для реактивных двигателей / Шаталов К.В., Лихтерова Н.М., Серегин Е.П., Кондратенко В.В. // *Технологии нефти и газа*. 2016. № 3 (104). С. 30–33.

18. Иовлева Е.Л. Исследование качества арктического дизельного топлива, привозимого в Республику Саха (Якутия) // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. №3(80). С. 58–361.

19. Носова Е.В., Сапрыгина В.Н. Экспериментальное исследование качества дизельного топлива // *Вестник ИрГТУ*. 2011. № 6 (53). С. 69–72.

20. S N Krivtsov and T I Krivtsova. Variations in health of piezoelectric elements of the Common Rail electric hydraulic nozzles in the operating conditions 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012022pp 9. doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012022.

21. Кривцов С.Н. Обоснование необходимости совершенствования стратегии технического сервиса аккумуляторных топливоподающих систем автомобильных дизельных двигателей // *Автотранспортное предприятие*. 2016. № 8. С. 44–47.

22. Методика и результаты трибологических исследований смесового рыжико-минерального топлива / Уханов А.П. [и др.] // *Наука в центральной России*. 2019. № 2 (38). С. 108–116.

23. Керученко Л.С., Веретено И.В. Влияние добавок масел растительного происхождения на смазывающие свойства дизельного топлива // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. № 4. С. 29–32.

24. Кривцов С.Н., Скребнев К.Е. Топливная экономичность дизельного двигателя при использовании растительных масел в качестве добавки к дизельному топливу // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2019. № 4 (70). С. 64–70.

REFERENCES

1. Pjen Djesin Biodizel' dlya uluchsheniya smazyvayushchikh svoystv dizel'nykh topliv s nizkim soderzhaniyem sery [Biodiesel for improving the lubricating properties of diesel fuels with low sulfur content] // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2016. 6(598): 46-48 (in Russian).

2. Shevchenko Ye.B. Biodizel' kak prisadka k dizel'nomu toplivu Shevchenko Ye.B. Neftepererabotka i neftekhimiya [Biodiesel as an additive to diesel fuel // Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices] // *Nauchno-tekhnicheskiye dostizheniya i peredovoy opyt*. 2013. 3: 28-30(in Russian).

3. Khayrudinov I.R. Issledovaniye svoystv efirov rapsovogo masla i ikh smesey s malosernistym dizel'nyim toplivom [Investigation of properties of rapeseed oil esters and their mixtures with low-sulfur diesel fuel] // Khayrudinov I.R., Zhirnov B.S., Sidrachova I.I. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskiye dostizheniya i peredovoy opyt*. 2011. 1: 43-45 (in Russian).

4. Elbashir N, Ahmed WJ, Alrachid A, Mohammed N, Elwahsh M. (2016). Role of Biodiesel in the Enhancement of GTL Diesel Fuel Properties. Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings

2016: EESP2727 <http://dx.doi.org/10.5339/qfarc.2016.EESP2727>.

5. Chalita Kaewbuddee, Ekarong Sukjit, Jiraphon Srisertpol, Somkiat Maithomklang, Khatha Wathakit, Niti Klinkaew, Pansa Liplap and Weerachai Arjharn Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines *Energies* 2020, 13: 2823; doi:10.3390/en13112823

6. Ekarong Sukjit, Karl D Dearn and Athanasios Tsolakis Interrogating the Surface: The Effect of Blended Diesel Fuels on Lubricity *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2012 5.1.

7. Knothe G., "Designer" Biodiesel: Optimizing fatty ester composition to improve fuel properties", *Energ Fuel* 2008 . 22: 1358-1364.

8. Lehto, K., Vepsäläinen, A., Kiiski, U., and Kuronen, M., "Diesel Fuel Lubricity Comparisons with HFRR and Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator Methods," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2014 7(3):842-848, <https://doi.org/10.4271/2014-01-2761>.

9. Perekrestov A.P., Klykanova A.A. Uluchsheniye smazochnoy sposobnosti ekologicheskoi chistogo dizel'nogo topliva s pomoshch'yu magnitno-mitsellyarnoy protivoznosnoy prisadki [Improving the lubricity of environmentally friendly diesel fuel with a magnetic micellar anti-wear additive] // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2012. 5: 5-7. (in Russian).

10. Kondrasheva N.K., Yeremeyeva A.M. Izucheniye vliyaniya prisadok i dobavok na ekspluatatsionnyye i ekologicheskiye kharakteristiki dizel'nogo topliva [Study of the effect of additives and additives on the operational and environmental characteristics of diesel fuel] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2017. 38 (64): 86-89. (in Russian)

11. Kashapova A.A. Issledovaniye smazyvayushchey sposobnosti dizel'nogo topliva [Investigation of the lubricity of diesel fuel] *Forum molodykh uchenykh*. 2017. 8 (12): 135-137 (in Russian).

12. Issledovaniye vliyaniya dlitel'nogo khraneniya dizel'nogo topliva na ekspluatatsionnyye kharakteristiki [Investigation of the effect of long-term storage of diesel fuel on operational characteristics] /Nurmukhametova E.R., Fatkhutdinova E.N., Sidorov G.M., Osipenko D.F. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2018. 9: 88-92. (in Russian).

13. Nadezhkin A.V. Lyu K.KH. Analiz metodov uluchsheniya smazyvayushchey sposobnosti malosernistykh sudovykh distillyatnykh topliv [Analysis of methods for improving the lubricity of low-sulfur marine distillate fuels] // *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. 4: 117-121 (in Russian).

14. Polucheniye prisadok dlya dizel'nogo topliva, ispol'zuyemogo v sel'skom khozyaystven [Obtaining additives for diesel fuel used in agriculture] /Romantsova S.V., Alibayev B.T., Kornev A.YU., Nagornov S.A. // *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2017. 1 (25): 54-62 (in Russian).

15. Sintez protivoznosnykh komponentov topliv iz vozobnovlyayemogo syr'ya [Synthesis of anti-wear components of fuels from renewable raw materials] //

Kornev A.YU., Romantsova S.V., Nagornov S.A., Alibayev B.T. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2017. 1 (22): 170-175 (in Russian).

16. Razrabotka metoda sinteza polifunktsional'noy prisadki k dizel'nomu toplivu na osnove proizvodnykh karbonovykh kislot i issledovaniye effektivnosti yeye deystviya [Development of a method for the synthesis of a multifunctional additive to diesel fuel based on carboxylic acid derivatives and investigation of the effectiveness of its action] / Akhmetov A.F., Khalilov L.M., Baulin O.A., Nel'kenbaum S.YA., Nel'kenbaum K.S. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoye delo*. 2021. 3: 110-123 (in Russian).

17. Shatalov K.V. Primeneniye polinenasyshchennykh zhirnykh kislot dlya uluchsheniya protivoznosnykh svoystv topliv dlya reaktivnykh dvigateley Shatalov K.V., Likhterova N.M., Seregin Ye.P., Kondratenko V.V. *Tekhnologii nefti i gaza*. 2016. 3 (104): 30-33 (in Russian).

18. Iovleva Ye.L. Issledovaniye kachestva arkticheskogo dizel'nogo topliva privozimogo v Respubliku Sakha (Yakutiya) [Investigation of the quality of Arctic diesel fuel imported to the Republic of Sakha (Yakutia)] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2018; 80(3): 358-361 (in Russian).

19. Nosova Ye.V., Saprygina V.N. Eksperimental'noye issledovaniye kachestva dizel'nogo topliva [Experimental study of diesel fuel quality] // *Vestnik IrGTU*. 2011. 6 (53): 69-72 (in Russian).

20. S N Krivtsov and T I Krivtsova. Variations in health of piezoelectric elements of the Common Rail electric hydraulic nozzles in the operating conditions 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012022pp 9. doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012022.

21. Krivtsov S.N. Obosnovaniye neobkhodimosti sovershenstvovaniya strategii tekhnicheskogo servisa akkumulyatornykh toplivopodayushchikh sistem avtomobil'nykh dizel'nykh dvigateley [Substantiation of the need to improve the strategy of technical service of battery fuel supply systems of automobile diesel engines] // *Avtotransportnoye predpriyatiye* 2016. 8: 44-47 (in Russian).

22. Metodika i rezul'taty tribologicheskikh issledovaniy smesevogo ryzhiko-mineral'nogo topliva [Methodology and results of tribological studies of mixed ginger-mineral fuel] / Ukhanov A.P., Machnev V.A., Rotanov Ye.G., Khokhlov A.L., Mar'in D.M., Khokhlov A.A. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2019. 2 (38): 108-116 (in Russian).

23. Keruchenko L.S. Vereteno I.V. Vliyaniye dobavok masel rastitel'nogo proiskhozhdeniya na smazyvayushchiye svoystva dizel'nogo topliva [The effect of vegetable oil additives on the lubricating properties of diesel fuel]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. 4: 29-32 (in Russian).

24. Krivcov S.N. Skrebnev K.E. Toplivnaya jekonomichnost' dizel'nogo dvigatelja pri ispol'zovanii rastitel'nykh masel v kachestve dobavki k dizel'nomu toplivu [Fuel efficiency of a diesel engine when using vegetable oils as an additive to diesel fuel]. *Transport na alternativnom toplive*. 2019. 4 (70): 64-70 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кривцов С. Н. – 50%. Кривцова Т. И. – 50%.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sergey N. Krivtsov 50 %, Tatyana I. Krivtsova 50 %.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРОВ

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильный транспорт».

Кривцова Татьяна Игоревна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильный транспорт».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey N. Krivtsov – Dr. of Sci., Professor of the Automobile Transport Department.

Tatyana I. Krivtsova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobile Transport Department.

Научная статья

УДК 656.135.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-544-553>

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ, ПРИМЕНИТЕЛЬНЫХ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕКРЕСТКА

В.В. Донченко, А.Н. Шумский

Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта (НИИАТ),
г. Москва, Россия

doncenko@niiat.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0544-7608>
shumskiy-msk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4339-5650>

АННОТАЦИЯ

Введение. Стремительный рост автомобильного парка страны и увеличивающиеся темпы объема перевозок приводят к возникновению различного рода транспортных проблем. Особенно остро это наблюдается на регулируемых участках, расположенных вблизи логистических парков, а также промышленных зонах городов. Здесь в общем транспортном потоке преобладают грузовые автомобили, которые отличаются от легковых автомобилей своими габаритными параметрами и динамическими характеристиками. Для единообразия транспортного потока определенное различие компенсируется специализированными коэффициентами приведения к условному легковому автомобилю. Выполненное исследование направлено на установление основных методов, применяемых при приведении грузовых транспортных средств к условному легковому автомобилю, и оценку существующих коэффициентов приведения грузовых транспортных средств к условному легковому автомобилю посредством определения значения приведенной интенсивности дорожного движения.

Методы и материалы. В рамках выполненного исследования применены натурные методы сбора данных для проведения последующего расчета. При осуществлении анализа определенных параметров установлены математические модели, лежащие в основе определенных значений коэффициентов приведения грузовых автомобилей к условному легковому автомобилю.

Результаты. В ходе выполненного исследования авторами произведена классификация методов определения коэффициентов приведения грузового автомобиля к условному легковому автомобилю. Установлены значения коэффициентов приведения по некоторым из них, которые возможно использовать при проведении расчета параметров регулируемого участка. Произведен расчет приведенной величины интенсивности дорожного движения на установленном объекте исследования – регулируемом перекрестке с использованием различных коэффициентов приведения, установленных ранее. Дана оценка полученным результатам.

Заключение. Анализ, полученный в результате расчетов, значений, показал значительное их отличие друг от друга с разницей в 12%, 53% и 300% от значения общей (неприведенной) интенсивности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузовые транспортные средства, коэффициент приведения, регулируемый участок, приведенная интенсивность

Статья поступила в редакцию 06.08.2021; одобрена после рецензирования 05.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Донченко В.В., Шумский А.Н. Оценка коэффициентов приведения грузовых автомобилей, применимых к расчету параметров регулируемого перекрестка // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 544-553. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-544-553>

© Донченко В.В., Шумский А.Н., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-544-553>

ESTIMATION OF TRUCK REDUCTION FACTORS APPLICABLE TO CALCULATION OF PARAMETERS OF A REGULATED INTERSECTION

Vadim V. Donchenko, Alexander N. Shumskiy

Open Joint Stock Company Research Institute of Automobile Transport (NIIAT)

doncenko@niiat.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0544-7608>

shumskiy-msk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4339-5650>

ABSTRACT

Introduction. The rapid growth of the country's car park and the increasing rate of traffic volume lead to various types of transport problems. This is especially acute in regulated areas located near logistics parks, as well as in industrial zones of cities. Here, in the general traffic flow, trucks prevail, which differ from passenger cars primarily in their overall dimensions and dynamic characteristics. For the uniformity of the traffic flow, a certain difference is compensated by specialized coefficients of converting to a conventional passenger car. The performed research is aimed at establishing the main methods used in bringing freight vehicles to a conventional passenger car and assessing the current coefficients of converting freight vehicles to a conventional passenger car by determining the value of the reduced traffic intensity.

Methods and materials. Within the framework of the study performed, natural methods of data collection were used for the subsequent calculation. When analyzing certain parameters, mathematical models have been established that underlie certain values of the coefficients of converting trucks to a conventional passenger car.

Results. In the course of the study, the authors classified the methods for determining the coefficients of bringing a truck to a conventional passenger car. The values of the reduction factors for some of them have been established, which can be used when calculating the parameters of the regulated section. The present value of road traffic on the set object of the study - the regulated intersection - has been calculated using different actuation coefficients established earlier. The results obtained are assessed.

Conclusion. The analysis of the values obtained as a result of calculations showed their significant difference from each other with a difference of 12%, 53% and 300% of the value of the total (not reduced) intensity. Based on the results obtained, the main tasks of further research are determined.

KEYWORDS: freight vehicles, reduction factor, adjustable area, reduced intensity

The article was submitted 06.08.2021; approved after reviewing 05.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Donchenko V.V., Shumskiy A.N. Estimation of truck reduction factors applicable to calculation of parameters of a regulated intersection. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 544-553. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-544-553>

© Donchenko V.V., Shumskiy A.N., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортной системы страны происходит по интенсивному сценарию [1, 2], который характеризуется увеличением объемов перевозимых грузов и активным строительством логистических парков [3, 4]. В свою очередь стремительный рост автомобильного парка страны и увеличивающиеся темпы объема перевозок приводят к возникновению различного рода транспортных проблем. Особенно остро это наблюдается на регулируемых участках, расположенных вблизи логистических парков, а также промышленных зонах городов.

Повышенная нагрузка на дорожную сеть, особенно в часы-пик, выражается большим количеством простоев и задержек, вызванных также повышенным влиянием грузового автотранспорта различной грузоподъемности [5]. Оценить степень влияния грузового автотранспорта в общем транспортном потоке возможно с использованием системы коэффициентов приведения, но в связи с постоянно меняющейся нагрузкой, которая оказывает влияние на динамику движения, на регулируемых участках наблюдается затруднительная ситуация в движении [6, 7]. Отсутствие на сегодняшний день методов программирования (расчета) оптимального режима управления, позволяющего оценить степень влияния грузового автотранспорта в общем транс-

портном потоке с учетом его динамических характеристик является проблемой, которая определяется повышенными задержками, сбоями доставки и даже аварийностью транспортно-логистического процесса. Активное развитие транспортно-логистического комплекса страны, увеличение грузопотока и грузооборота в совокупности с неприспособностью дорожно-транспортной сети, особенно регулируемых участков, к такому процессу приведет к ухудшению транспортной ситуации и повышению количества дорожно-транспортных происшествий [8, 10].

В результате определенной проблемы сформулирована основная цель проводимого исследования – произвести оценку существующих коэффициентов приведения грузовых транспортных средств к условному легковому автомобилю.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ научных трудов [11, 12, 13, 14, 15] позволил систематизировать основные методы определения коэффициентов приведения грузового автомобиля к условному легковому автомобилю (рисунок 1).

В общем транспортном потоке грузовые транспортные средства оказывают негативное влияние, которое объясняется тремя факторами:



Рисунок 1 – Методы определения коэффициента приведения грузового автомобиля к условному легковому автомобилю в общем транспортном потоке

Figure 1 – Methods for determining the truck reduction factors to a conventional car in the total traffic flow

1) грузовой автотранспорт больше легкового;

2) по эксплуатационным характеристикам грузовой уступает легковому;

3) грузовой автотранспорт оказывает физическое воздействие на находящиеся поблизости транспортные средства и психологическое воздействие на водителей этих транспортных средств, особенно при выполнении маневров – перестроении, поворота [16, 17] и пр.

Если в рассматриваемых методах (см. рисунок 1) первые два фактора учитываются, то третий, позволяющий более полно характеризовать движение в зоне регулируемого участка, рассматривается только в методе, основанном на движении, предложенным и изученным Р.А. Краммесом.

Р.А. Краммес [11] предположил, что проблемы, связанные с движением грузового автотранспорта, такие как аэродинамические нарушения, брызги, блокировка знаков и пр. могут способствовать снижению пропускной способности из-за их влияния на то, как находящиеся поблизости транспортные средства используют проезжую часть.

Результаты статистического анализа на скоростных участках дорог, проведенного Р.А. Краммесом, показали, что на расстояние между транспортными средствами оказывают влияние типы транспортных средств. Например, при наличии впереди грузового транспортного средства, за следующим за ним легковым автомобилем, в первую очередь ограничено расстояние видимости, что, согласно наблюдениям, является основанием для увеличения расстояния до впереди идущего грузового транспортного средства.

В научном исследовании [11] представлена формула, согласно которой предлагается определять значение коэффициента приведения (PCE – Passenger Car Equivalent) в смешанном транспортном потоке:

$$PCE = (1/p)[(\bar{h}_M - \bar{h}_B)/\bar{h}_B] + 1, \quad (1)$$

где p – доля грузового автотранспорта; \bar{h}_i – средний интервал времени в секундах при данной скорости потока для основного потока ($i = B$) или эквивалентного смешанного потока ($i = M$).

В исследовании [11] был выполнен анализ движения на различных участках дорог – автострады (загородные двухполосные и многополосные участки) и городские улицы (регулируемые и нерегулируемые участки) для прямых участков движения, и получены значения принимаемого коэффициента приведения грузового автомобиля к условному легковому автомобилю в зависимости от уровня обслуживания исследуемого участка, в частности, скоростной магистрали (таблица 1).

В свою очередь регулируемый перекресток аналогично можно характеризовать определенными уровнями обслуживания и инвертировать полученные данные при анализе прямых участков движения.

Представленные коэффициенты приведения (см. таблицу 1) позволяют учитывать специфику движения на рассматриваемом участке, в данном случае скоростной автомагистрали, но аналогичный подход возможен к применению и для регулируемого перекрестка за счет уровня обслуживания. Но представленные значения не позволяют оценить возможное разнообразие грузового транспорта, в первую очередь по грузоподъемности и их скоростным характеристикам.

В исследовании, выполненном Н. Вебстером [14,15], которое в общей схеме методов (см. рисунок 1) именуется как метод на основе плотности транспортного потока, впервые было установлено, что влияние грузового автотранспорта и его учет в общем транспортном потоке с использованием коэффициентов приведения напрямую связан с эксплуатационными характеристиками. В данном исследовании было изучено влияние двух критических с точки зрения эксплуатации характеристик транспортного средства: удельной массы грузового автомобиля и его габаритной длины.

Таблица 1
Рекомендуемые к использованию коэффициенты приведения, полученные в результате исследований Р.А. Краммеса

Table 1
Recommended reduction factors for use, obtained as a result of research by R.A. Krammers

Наименование участка	Уровень обслуживания		
	A	B	C
Скоростная магистраль	1,1	1,2	1,4

В результате исследований для определения коэффициента приведения получено уравнение

$$PCE_s = \frac{1}{\Delta_p} \left[\frac{q_B}{q_s} - \frac{q_B}{q_M} \right] + 1, \quad (2)$$

где PCE_s – значение PCE рассматриваемого транспортного средства, Δ_p – доля рассматриваемого транспортного средства, которая добавляется к общему потоку и вычитается из потока базовых транспортных средств, q_B – поток базовых транспортных средств (легковых) при постоянной плотности движения, q_M – смешанный поток транспортных средств при постоянной плотности движения, q_s – рассматриваемый поток транспортных средств при постоянной плотности движения.

По результату проведенного модельного эксперимента для определенных типов грузовых автомобилей, отличных по габаритной длине и максимальной снаряженной массе (таблица 2), были установлены коэффициенты приведения к условному легковому автомобилю, которые несмотря на разнообразие грузового подвижного состава составили 1,75.

В отечественной практике, согласно нормативному источнику СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги, грузовые транспортные средства» не в зависимости от их процентного наличия в общем транспортном потоке и типа движения, характеризуемого плотностью [18, 19, 20] и описываемого определенным уровнем обслуживания [21, 22], рекомендуют принимать согласно таблице 3.

Таблица 2
Установленные типы грузовых транспортных средств

Table 2
Established types of freight vehicles

Тип грузовика	Сокращение	Длина, м	Максимальная снаряженная масса, т
Двухосный тягач с трехосным полуприцепом	CS5	19,8	23
Длинномерный грузовик	SU2	12,2	4,5
Полуприцеп с четырьмя осями	CS4	19,8	16
Грузовик с двухосным прицепом	DS5	22,9	32
Грузовик с трехосным прицепом	TRP	30,5	47,5

Таблица 3
Рекомендуемые коэффициенты приведения в соответствии с СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги»

Table 3
Recommended reduction factors in accordance with SP 34.13330.2012 Highways

Типы транспортных средств	Коэффициент приведения
Легковые автомобили	1
Мотоциклы с коляской	0,75
Мотоциклы и мопеды	0,5
Грузовые автомобили грузоподъемностью, т:	
2	1,5
6	2
8	2,5
14	3
свыше 14	3,5
Автопоезда грузоподъемностью, т:	
12	3,5
20	4

Таблица 4
Рекомендуемые коэффициенты приведения в соответствии
с исследованиями А.Г. Левашева

Table 4
Recommended reduction factors in accordance with the research of A.G. Levashev

Типы транспортных средств	Коэффициент приведения
Легковые автомобили	1,000
Микроавтобус	1,093
Грузовой автомобиль грузоподъемностью:	
до 2 т	1,179
от 2 до 6 т	1,480
свыше 6 т	1,647
Автобус малой вместимости	1,367
Автобус большой вместимости	1,839
Сочлененный автобус / троллейбус	2,362
Автопоезд	2,231

На сегодняшний день в соответствии с нормативным источником коэффициент приведения грузового автомобиля, отличного от установленных в таблице 4, рекомендуется определять интерполяцией.

Кроме этого, в отечественной практике также существуют определенные исследования в рассматриваемой предметной области [6]. В результате выполненных исследований на регулируемом перекрестке А.Г. Левашевым¹ были предложены коэффициенты приведения для различных типов транспортных средств, в том числе и грузовых, различной грузоподъемности, полученных на основании оценки стартовой задержки (таблица 4).

По результату определенных коэффициентов приведения грузовых автомобилей к условному легковому автомобилю, возможных для использования при расчете параметров принудительного управления, определена различность математических моделей (1), (2), которая может привести к существенной разнице значения приведенной интенсивности дорожного движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения разницы итогового значения приведенной интенсивности в рамках дан-

ного исследования выполнен натурный эксперимент по сбору транспортных характеристик и последующий расчет с использованием определенных значений коэффициентов приведения. Объектом исследования стал управляемый с помощью светофора перекресток ул. Садовая – ул. Заборье, расположенный в непосредственной близости от одного из наиболее крупных транспортных логистических парков «Северное-Домодедово» (Московская обл.), предметом исследования стала величина приведенной интенсивности дорожного движения. В результате исследования, проведенного в весенне-летний период (15.06.2021 г.), был произведен суточный срез, согласно которому определен суточный трафик исследуемого участка (рисунок 2). Суточная интенсивность составляет 94 390 авт/сут, транспортный поток представлен легковыми, грузовыми и пассажирскими транспортными средствами, в связи с тем что исследование направлено на оценку грузового автотранспорта, в рамках выполненного натурального изыскания определено три типа грузовых автомобилей, представленных в общем составе, различной грузоподъемности – до 10 т, от 10 до 20 т и свыше 20 т.

¹ Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Головных И.М. Проектирование регулируемых пересечений: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИргТУ. 2007. 208 с.

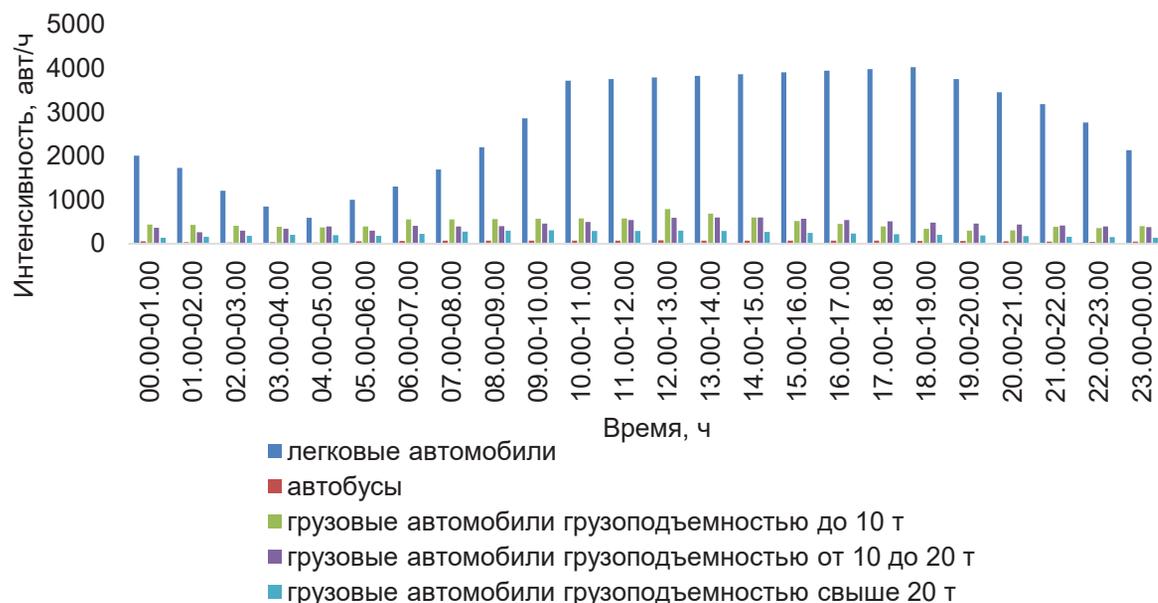


Рисунок 2 – Гистограмма суточной интенсивности на пересечении ул. Садовая – ул. Заборье (Московская обл.)

Figure 2 – Histogram of daily intensity at the intersection of st. Sadovaya – st. Zaborie (Moscow region)

Наиболее нагруженным периодом времени оказался период времени с 12.00–13.00, часовая интенсивность движения составила 5554 авт/ч. Из общего транспортного потока за рассматриваемый период времени доля грузовых автомобилей составляла 30%, что позволяет судить о высокой степени загруженности грузовыми транспортными средствами на объекте исследования.

Для достижения основной цели в рамках научной статьи осуществлено приведение полученной пиковой интенсивности с использованием определенных ранее коэффициентов приведения, полученных Р.А. Краммерсом, Н. Вебстером, определенных в отечественной нормативной документации и установленных А.Г. Левашевым [6] (рисунок 3).

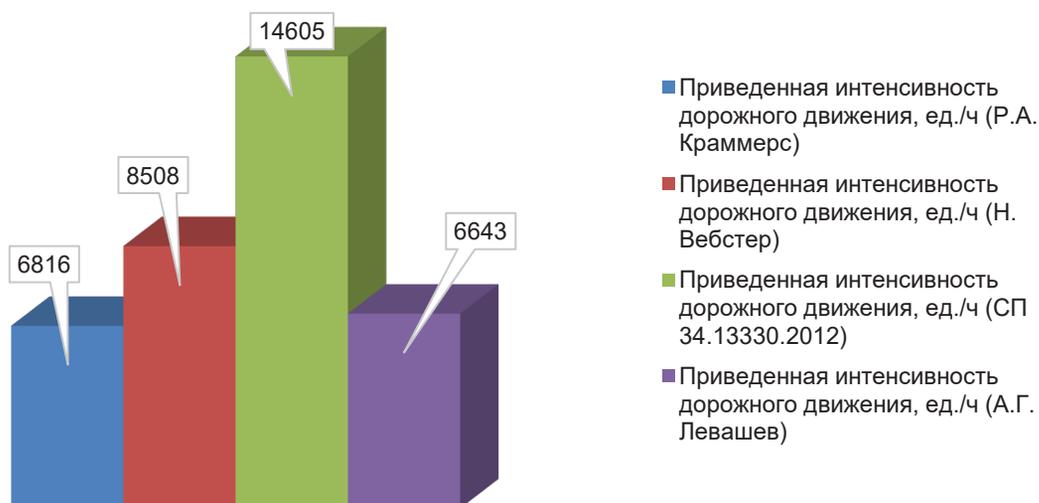


Рисунок 3 – Результат произведенного расчета величины приведенной интенсивности

Figure 3 – The result of the calculation of the value of the reduced intensity

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненного расчета были получены значения, отличные друг от друга. Так, используя коэффициенты приведения грузовых автомобилей к условному легковому, рекомендуемые Р.А. Краммерсом, значение приведенной интенсивности будет отличным от интенсивности пикового периода на 12% и составит 6227 ед./ч, значения, полученные в результате использования коэффициента приведения, рекомендуемого А.Г. Левашевым, приведут к различию в 19% (6643 ед./ч). Применяв коэффициент, рекомендуемый Н. Вебстером, значения будут отличны на 61%, и приведенная интенсивность составит 8950 ед./ч. Наибольшее значение было получено при использовании отечественного норматива СП 34.13330.20212 и превысило пиковое значение в 3 (!) раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют судить о необходимости проведения исследований в данной области и уточнения коэффициентов приведения. В свою очередь использование полученных результатов в дальнейших расчетах, а именно в определении параметров при установлении принудительного управления при помощи светофоров приведет к различности полученных результатов, в первую очередь потока насыщения и степени насыщения [23, 24], что, безусловно, окажет влияние на режимы движения и станет причиной увеличенного времени простоя [25].

В качестве направления дальнейшего исследования необходимым мероприятием является разработка подхода к определению основных оптимальных параметров принудительного управления, учитывающих преобладающий тип транспорта – грузовой – в общем транспортном потоке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов М. Транспортная стратегия России на период до 2030 года // Транспортная стратегия – XXI век. 2013. № 22. С. 7–9.
2. Хегай Ю.А. Проблемы и перспективы развития транспортной системы в России // Теория и практика общественного развития. 2014. № 4. С. 205–207.
3. Николаев Р.С. Транспортно-логистический комплекс страны в условиях структурной перестройки экономики: макроэкономические подходы к анализу эффективности // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2018. Т. 13, № 2. С. 228–250.
4. Печерская О.А., Макарьева Е.А. Факторы, влияющие на развитие транспортно-логистического комплекса // Альтернативные транспортные технологии. 2018. Т. 5, № 1 (8). С. 34–37.
5. Новиков И.А., Медведев М.И., Шевцова А.Г. Влияние динамических характеристик грузового автотранспорта на параметры регулируемого перекреста // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 1 (56). С. 62–69.
6. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю. Уточнение коэффициентов приведения к легковому автомобилю для расчетов режимов регулирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 1 (21). С. 138–143.
7. Новиков И.А., Шевцова А.Г. Влияние изменения задержек транспортных средств на количество режимов работы светофорного объекта // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 4 (35). С. 62–68.
8. Кравченко П.А., Жанказиев С.В., Олещенко Е.М. Концепция обеспечения нулевой смертности на дорогах России как механизм борьбы с причинами дорожно-транспортных происшествий // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 4 (83). С. 3–7.
9. Новиков И.А., Кравченко А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В. Научно-методологический подход к снижению аварийности на дорогах Российской Федерации // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 58–64.
10. Nassiri H. Delay-based passenger car equivalents at signalized intersections in Iran / Nassiri H., Tabatabaie S., Sahebi S. // Traffic & Transportation, vol. 29, no. 2, pp. 135–142, 2017
11. Krammes R. A. Passenger car equivalents for trucks on level freeway segments / Krammes R. A. Crowley K. W. // Transportation Research Record, vol. 1091, pp. 10–17, 1986.
12. Craus J. A revised method for the determination of passenger car equivalencies / Craus J., Abishai P., Itzhak G. // Transportation Research Part A: General, vol. 14, no. 4, pp. 241–246, 1980
13. Keller E. Passenger car equivalents from network simulation / Keller E., Saklas J. // Journal of Transportation Engineering, vol. 110, no. 4, pp. 397–411, 1984.
14. Elefteriadou L. Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials / Elefteriadou L., Torbic D., Webster N. // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1572, no. 1, pp. 51–58, 1997
15. Webster N. A simulation study of truck passenger car equivalents PC on basic freeway sections / Webster N., Elefteriadou L. // Transportation Research Part B: Methodology, vol. 33, no. 5, pp. 323–336, 1999.
16. Дорохин С.В., Лихачев Д.В. Анализ подходов к вводу специализированной левоповоротной полосы при использовании светофорного регулирования // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 43–50.

17. Жигадло А.П., Дорохин С.В., Лихачев Д.В. Новый подход к вводу дополнительной левоповоротной секции светофорного регулирования // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 4 (68). С. 432–445.

18. Столяров В.В., Немчинов Д.М., Гусев В.А., Щеголева Н.В. Математическая модель транспортного потока, основанная на микроскопической теории «следования за лидером» // Дороги и мосты. 2015. № 2 (34). 20 с.

19. Бугаев А.С., Таташев А.Г., Яшина М.В., Лавров О.С., Носов Е.А. Восстановление динамики транспортного потока на основе детерминированно-стохастической модели и данных с интеллектуально транспортных систем // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13, № 10. С. 35–44.

20. Скворцова Т.В., Дорохин С.В., Кондрашова Е.В. Модель распределения транспортных потоков автомобилей // Моделирование систем и процессов. 2014. № 3. С. 28–32.

21. Власов В.М., Богумил В.Н. Методика оценки показателей «уровней обслуживания движения», адаптированных к городским условиям // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 4 (43). С. 69–75.

22. Полтавская Ю.О. Повышение пропускной способности и уровня обслуживания в транспортной теории // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2019. Т. 1. С. 200–201.

23. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Методы определения потока насыщения автотрассы // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 3 (47). С. 44–51.

24. Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Основные принципы расчета программы светофорного регулирования на основе управляемых сетей и потока насыщения // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 6 (70). С. 680–691.

25. Novikov A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Т. 17. № 2. С. 175–181.

REFERENCES

1. Sokolov M. Transportnaja strategija Rossii na period do 2030 goda [Transport strategy of Russia for the period up to 2030]. *Transport strategy - XXI century*. 2013. 22: 7-9. (in Russian)

2. Khegay Yu.A. Problemy i perspektivy razvitiya transportnoj sistemy v Rossii [Problems and Prospects for the Development of the Transport System in Russia]. *Theory and practice of social development*. 2014. 4: 205-207. (in Russian)

3. Nikolaev R.S. Transportno-logisticheskij kompleks strany v uslovijah strukturnoj perestrojki jekonomiki: makrojekonomicheskie podhody k analizu jeffektivnosti [Transport and logistics complex of the country in the context of structural restructuring of the economy: macroeconomic approaches to the analysis of efficiency] *Bulletin of Perm University. Series: Economics*. 2018. 13(2): 228-250. (in Russian)

4. Pecherskaya O.A. Makarieva E.A. Faktory, vlijajushhie na razvitie transportno-logisticheskogo kompleksa [Factors affecting the development of the transport and logistics complex] *Alternative transport technologies*. 2018. 5. 1 (8): 34-37. (in Russian)

5. Novikov I.A. Medvedev M.I., Shevtsova A.G. Vlijanie dinamicheskikh harakteristik gruzovogo avtotransporta na parametry reguliruemogo perekresta [Influence of dynamic characteristics of freight vehicles on the parameters of the controlled crossing] *World of Transport and Technological Machines*. 2017. 1 (56): 62-69. (in Russian)

6. Levashev A.G., Mikhailov A.Yu. Utochnenie koeficientov privedenija k legkovomu avtomobilju dlja raschetov rezhimov regulirovanija [Refinement of coefficients of reduction to a passenger car for calculating regulation modes] *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2005. 1 (21): 138-143. (in Russian)

7. Novikov I.A., Shevtsova A.G. Vlijanie izmenenija zaderzhek transportnyh sredstv na kolichestvo rezhimov raboty svetofornogo ob#ekta [Influence of changes in vehicle delays on the number of operating modes of a traffic light object] *World of Transport and Technological Machines*. 2011. 4 (35): 62-68. (in Russian)

8. Kravchenko P.A., Zhankaziev S.V., Oleshchenko E.M. Koncepcija obespechenija nulevoj smertnosti na dorogah Rossii kak mehanizm bor'by s prichinami dorozhno-transportnyh proisshestvij [The concept of ensuring zero mortality on the roads of Russia as a mechanism for combating the causes of road traffic accidents] *Transport of the Russian Federation*. 2019. 4 (83): 3-7. (in Russian)

9. Novikov I.A., Kravchenko A.A., Shevtsova A.G., Vasilyeva V.V. Nauchno-metodologicheskij podhod k snizheniju avarijnosti na dorogah Rossijskoj Federacii [Scientific and methodological approach to reducing accidents on the roads of the Russian Federation] *World of Transport and Technological Machines*. 2019. 3 (66): 58-64. (in Russian)

10. Nassiri H. Delay-based passenger car equivalents at signalized intersections in Iran / Nassiri H., Tatabaie S., Sahebi S. // *Traffic & Transportation*, 2017 29(2): 135–142

11. Krammes R. A. Passenger car equivalents for trucks on level freeway segments / Krammes R. A. Crowley K. W. // *Transportation Research Record*, 1986. 1091: 10–17.

12. Craus J. A revised method for the determination of passenger car equivalencies / Craus J., Abishai P., Itzhak G. // *Transportation Research Part A: General*, 1980 14(4): 241–246.

13. Keller E. Passenger car equivalents from network simulation / Keller E., Saklas J. // *Journal of Transportation Engineering*, 1984 110(4): 397–411.

14. Elefteriadou L. Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials / Elefteriadou L., Torbic D., Webster N. // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1997. 1: 51–58,

15. Webster N. A simulation study of truck passenger car equivalents PC on basic freeway sections /

Webster N., Elefteriadou L. // *Transportation Research Part B: Methodology*, vol. 33, no. 5, pp. 323–336, 1999.

16. Dorokhin S.V., Likhachev D.V. Analiz podhodov k vvodu specializirovannoj levopovorotnoj polosy pri ispol'zovanii svetofornogo regulirovaniya [Analysis of approaches to the introduction of a specialized left turn lane when using traffic light regulation] // *World of Transport and Technological Machines*. 2019. 3 (66): 43-50. (in Russian)

17. Zhigadlo A.P. Dorokhin S.V., Likhachev D.V. Novyj podhod k vvodu dopolnitel'noj levopovorotnoj sekcii svetofornogo regulirovaniya [A new approach to the introduction of an additional left-turn section of traffic light regulation] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 4 (68): 432-445. (in Russian)

18. Stolyarov V.V. Nemchinov D.M., Gusev V.A., Shchegoleva N.V. [Mathematical model of traffic flow based on the microscopic theory of "following the leader"] *Roads and bridges*. 2015. 2 (34): 20. (in Russian)

19. Vosstanovlenie dinamiki transportnogo potoka na osnove determinirovanno-stohasticheskoj modeli i dannyh s intellektual'no transportnyh sistem [Reconstruction of traffic flow dynamics based on deterministic-stochastic model and data from intelligent transport systems] / Bugaev A.S., Tatashev A.G., Yashina M.V., Lavrov O.S., Nosov E.A. // *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2019.13(10): 35-44. (in Russian)

20. Skvortsova T.V. Dorokhin S.V., Kondrashova E.V. Model' raspredeleniya transportnyh potokov avtomobilej [Model of distribution of traffic flows of cars] *Modeling systems and processes*. 2014. 3: 28-32. (in Russian)

21. Vlasov V.M., Bogumil V.N. Metodika ocenki pokazatelej «urovnej obsluzhivaniya dvizheniya», adaptirovannyh k gorodskim usloviyam [Methods for assessing the indicators of "traffic service levels" adapted to urban conditions] *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2015. 4 (43): 69-75. (in Russian)

22. Poltava Yu.O. Povyshenie propusknoj sposobnosti i urovnja obsluzhivaniya v transportnoj teorii [Increasing capacity and service level in transport theory] *Modern technologies and scientific and technical progress*. 2019. 1: 200-201. (in Russian)

23. Borovskaya A.E. Metody opredeleniya potoka nasyshheniya avtotrassy [Methods for determining the saturation flow of a highway] / Borovskaya A.E.,

Shevtsova A.G. // *World of transport*. 2013. 11. 3(47): 44-51. (in Russian)

24. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. Osnovnye principy rascheta programmy svetofornogo regulirovaniya na osnove upravlyaemyh setej i potoka nasyshheniya [Basic principles of calculating a traffic light control program based on controlled networks and saturation flow] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 6 (70): 680-691. (in Russian)

25. Novikov A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. // *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17.(2):175-181.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Донченко В.В. Постановка цели и задачи исследования.

Шумский А.Н. Выполнение анализа определенных методов, проведение натурных исследований, осуществление расчетов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vadim V. Donchenko Statement of the goal and objectives of the study.

Alexander N. Shumskiy Analysis of certain methods, field research, calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Донченко Вадим Валерианович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, научный руководитель ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта».

Шумский Александр Николаевич – аспирант ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта», руководитель экспертного центра «Probok.net»

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim V. Donchenko (Moscow, Russia) – Cand. of Sci., senior researcher, scientific director of Scientific Research Institute of Automobile Transport

Alexander N. Shumskiy - post-graduate student of the Scientific Research Institute of Automobile Transport, Head of the Probok.net Expert Center.

Научная статья

УДК 625.098

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-554-564>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА В ГОРОДЕ ТАМБОВЕ

А. А. Гуськов, Н. А. Степанов, С. А. Анохин

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

tyoma-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2146-3712>

nikita29121997@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8949-737X>

fwut@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7307-6047>

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается проблематика транспортного шума на улично-дорожной сети городов. Исследуются причины ежегодного увеличения уровня звука на городских дорогах в России и за рубежом, а также факторы, способствующие этому. Цель работы: на основании проведенного теоретического исследования и полученных экспериментальных данных разработать мероприятия, способствующие повышению экологической безопасности города, построить модели зависимости уровня шума от интенсивности движения с учетом особенностей организации дорожного движения и градостроительства в г. Тамбове.

Материалы и методы. Измерения уровня звука на улично-дорожной сети г. Тамбова проводились в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ 20444–2014, которая предусматривала оценку фактических шумовых характеристик транспортных потоков (в разрезе по типу транспортного средства). Замеры проводились с помощью шумомера летом и зимой в пиковое и межпиковое время в будние дни.

Результаты. Исследование уровня шума на улично-дорожной сети г. Тамбова показало превышение данного показателя относительно нормы на 7–18% в зависимости от пикового и межпикового времени, а также летнего и зимнего периода. Построена зависимость интенсивности движения транспортных средств от уровня шума в летний и зимний период.

Обсуждение и заключение. Были предложены мероприятия, в том числе градостроительные, способствующие снижению уровня звука на рассматриваемых участках. Комплекс указанных мероприятий позволит снизить уровень транспортного шума на улично-дорожной сети города в среднем на 5–15 дБА.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортный шум, улично-дорожная сеть, транспортные потоки, экология, заборы, интенсивность движения, автомобильная дорога

Статья поступила в редакцию 26.08.2021; одобрена после рецензирования 15.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Гуськов А.А., Степанов Н.А., Анохин С.А. Исследование транспортного шума в городе Тамбове // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т.18, № 5(81). С. 554-564. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-554-564>

© Гуськов А. А., Степанов Н. А., Анохин С. А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-554-564>

TRAFFIC NOISE RESEARCH IN TAMBOV CITY

Artem A. Guskov, Nikita A. Stepanov, Sergey A. Anokhin
Tambov State Technical University, Tambov, Russia
tyoma-1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2146-3712>
nikita29121997@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8949-737X>
fwut@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7307-6047>

ABSTRACT

Introduction. The problem of traffic noise on the road network of cities is considered. The reasons for the annual increase in the sound level on urban roads in Russia and abroad, as well as the factors contributing to this, are investigated. The purpose of the work: on the basis of the conducted theoretical research and the obtained experimental data, to develop measures that contribute to improving the environmental safety of the city, to build a model of the dependence of the noise level on the traffic intensity, taking into account the peculiarities of the organization of traffic and urban planning in Tambov.

Materials and methods. Sound level measurements on the Tambov road network were carried out in accordance with the methodology specified in GOST 20444-2014, which provided for the assessment of the actual noise characteristics of traffic flows (by vehicle type). The measurements were carried out using a noise meter in summer and winter during peak and inter-peak times on weekdays.

Results. The study of the noise level on the Tambov street and road network showed an excess of this indicator relative to the norms by 7-18%, depending on peak and inter-peak time, as well as the summer and winter period. The dependence of the traffic intensity of vehicles on the noise level in the summer and winter periods is constructed.

Discussion and conclusion. The measures were proposed, including urban planning, to reduce the sound level in the areas under consideration. The complex of these measures will reduce the level of traffic noise on the city's road network by an average of 5-15 dBA.

KEYWORDS: traffic noise, road network, traffic flows, ecology, congestion, traffic intensity, road

The article was submitted 26.08.2021; approved after reviewing 15.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Guskov A.A., Stepanov N.A., Anokhin S.A. Traffic noise research in tambov city. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 554-564. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-554-564>

© Guskov A.A., Stepanov N.A., Anokhin S.A., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Из всех глобальных экологических проблем в городах можно выделить акустическое загрязнение, так как оно одно из наиболее распространенных. Проблематика транспортного шума на улично-дорожной сети (УДС) городов на сегодняшний день остается достаточно актуальной. Постоянное увеличение количества наземного транспорта, а вследствие и интенсивности движения неблагоприятно влияет на показатели уровня звука. Шум от транспортного потока вносит существенный вклад в загрязнение города. Наиболее уязвимыми к урону шуму являются города с плотной застройкой.

Известно, что шум оказывает негативное воздействие на окружающую среду, создавая при этом неблагоприятные условия для проживания человека и нанося вред здоровью [1, 2, 3]. Особенно опасным для жизни и здоровья является длительное воздействие шума, что в дальнейшем ведет к расстройству нервной системы, нарушениям слуха и зрения, повышенной утомляемости и другим острым и хроническим заболеваниям.

В условиях города транспортный шум не является единственным источником отрицательного воздействия на окружающую среду. Совокупность отработавших газов транспортных средств (загазованности), запыленности и шума является еще более опасным негативным фактором влияния на экологию города. Поэтому при разработке мероприятий, повышающих экологическую безопасность города, следует рассматривать данные негативные факторы комплексно.

В работах [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] авторами рассматривается проблематика транспортного шума в городах. В связи с развитием промышленности, транспорта возрастает актуальность данных исследований. Шумовой режим города зависит от его величины, планировочной структуры, развития промышленности, мощности и характера размещения источников шума, от планировочного решения улично-дорожной сети, организации движения внутригородского и внешнего транспорта, от рельефа местности и степени благоустройства селитебной территории и т. д.

Среди причин, вызывающих увеличение уровня шума в городах, можно выделить основные [6, 7, 9]:

- высокая интенсивность движения городского наземного транспорта;
- наличие грузового транспорта в общем потоке [11];

- наличие железнодорожных путей вблизи жилых зон;

- недостаточное количество транспортных развязок для организации движения в разных уровнях [12];

- нарушение требований правил (СП 42.13330.2016) в части несоблюдения минимального расстояния от края проезжей части до жилого здания и др.

Исследования показывают, что за последние годы уровень транспортного шума в городах России увеличился в среднем на 13–17 дБ, а на некоторых городских магистралях крупных городов достигает 95–100 дБ [13, 14, 15]. Причем авторами большинства публикаций прогнозируется дальнейшее ухудшение экологической обстановки в городах, основанное на росте шумового загрязнения окружающей среды.

Существующий характер движения транспортных средств по городским автомобильным дорогам (частая смена движения с постоянной скорости на торможение) способствует увеличению шумовых показателей [5]. Параметры светофорного регулирования, характер и условия движения, уровень загрузки перекрестков – факторы, оказывающие непосредственное влияние на движение транспортного средства по дороге с постоянной скоростью.

За рубежом проблема транспортного шума в городах также существует. Особенно остро это можно увидеть в странах Азии, таких как Индия, Индонезия, Таиланд, Малайзия и др. Авторами публикаций [16, 17, 18, 19] отмечается, что основным источником шума являются транспортные средства, предназначенные для перевозки пассажиров (общественный транспорт), а также мототранспорт. В европейских странах активно проводятся исследования причин повышенного шума в городах [20, 21], основным источником шума указывается ежегодное увеличение количества транспортных средств на дорогах города.

В работе [15] отмечается, что на территории Палестины отсутствуют законодательные акты и нормативы, регламентирующие уровень звука на городской автомобильной дороге. Причем в стране практически отсутствуют исследования, связанные с транспортным шумом в городах. Авторами данной работы были проведены исследования в г. Хеврон (высокая плотность населения, большая интенсивность движения транспорта), показавшие превышение мировых стандартов по уровню звука на 10–15 дБА.

В качестве основных методов борьбы с шумом в городах можно выделить: зонирование территорий (запрет отведения земель под жилую застройку, расположенных вдоль транспортных коридоров) [22], защитные насаждения [23], шумопоглощающие и шумоотражающие (экранирующие) конструкции, совершенствование организации дорожного движения в городах, эксплуатация более экологичного транспорта [24], шумогасящий асфальт [25] и др.

В своих исследованиях [26] авторы рассматривают подходы к методикам измерения уровня звука в городах и дальнейшей обработки результатов. Предложена методика акустического картирования города на основе двухпараметрической модели спектра, которая позволяет не только оценивать уровень шумовой загрязненности, но и проводить анализ распределения энергии в спектре акустических шумов [27]. Для более точного и эффективного мониторинга транспортного шума в крупных городах используются специальные датчики, позволяющие отслеживать параметры звука в режиме реального времени и представлять полученные данные в виде карт шума [28].

Приведенные выше исследования авторов показывают наличие многочисленных проблем существующей городской инфраструктуры и дальнейшего его развития в плане экологичности. Сформированная на сегодняшний день городская застройка не соответствует современным экологическим требованиям. Точечная застройка существующих жилых районов ещё больше ухудшает данную проблему. В отдельных городах России просматривается отсутствие достаточного финансирования на реализацию проектов новых жилых районов и транспортных магистралей с точки зрения экологичности. Это приводит к тому, что жилые постройки возводятся на достаточно близком расстоянии от автомобильных дорог средней интенсивности. Авторами исследований очень слабо рассматриваются факторы, влияющие на увеличение уровня шума, такие как техническое состояние транспортных средств, качество дорожного покрытия.

Целью работы является проведение исследования уровня транспортного шума в г. Тамбове, определение мероприятий по снижению уровня звука, а также построение модели зависимости уровня шума от интенсивности движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения проводились в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ 20444–2014, для оценки фактических шумовых характеристик транспортных потоков, состоящих из легковых и грузовых автомобилей, автобусов, троллейбусов, мотосредств, а также других видов автотранспортных средств на автомобильных дорогах улично-дорожной сети города. Точка замера была расположена на расстоянии 4 м от края проезжей части, высоте над уровнем земли 1,2 м. Замеры уровня транспортного шума проводились с помощью шумомера МЕГЕОН-92130 в количестве 20 шт., продолжительность каждого замера одна минута. Период замеров был выбран в пиковое и межпиковое время: будние дни днем с 14:00 до 14:20 и вечером с 17:40 до 18:00.

Для анализа уровня шума на улично-дорожной сети г. Тамбова были выбраны следующие участки: ул. Б. Васильева в районе дома № 4; перекресток ул. Советская – ул. Чичканова (остановка « Улица Чичканова», нечетная сторона ул. Советской); ул. Киквидзе (остановка « Улица Киквидзе», нечетная сторона ул. Киквидзе); перекресток ул. Советская – ул. Московская (остановка « Московская улица», нечетная сторона ул. Советской).

Выбор рассматриваемых участков производился на основе анализа данных об интенсивности движения транспортных средств, составе транспортного потока, расположении вблизи места замера уровня шума жилых зданий или центров притяжения пассажиров (транспортно-пересадочные узлы, торговые центры, концентрации жилых и рабочих мест, инфраструктурные объекты) и других параметров. Был проведен опрос населения среди лиц непосредственно проживающих, работающих или использующих данные места для других целей. Задачей опроса было выявление мест с повышенным уровнем шума по мнению данных лиц. В проведении исследования не участвовали места, вблизи которых присутствовали строящиеся объекты. Таким образом, шумовой фон не был загрязнен шумами, искажающими общую акустическую ситуацию. Показатели определялись натурными методами и с помощью средств видеofиксации.

Основная функция, задействованная в шумомере, – «звук». Несмотря на то что на селитебных территориях предъявляются различные требования, в условиях плотной городской

застройки справедливо сопоставлять данные по транспортному шуму с нормативными данными. Допустимые значения уровня шума в зданиях и территориях города закреплены в санитарных нормах СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования транспортных потоков и уровней шума проводились авторами в 2020–2021 гг. Известно, что интенсивность движения в течение года неодинаковая, причем в летний период данный показатель меньше, чем в осенний, весенний и зимний. В работе приводятся данные, полученные в летний и зимний период.

В таблице 1 представлены данные по интенсивности движения автомобилей, полученные в различных районах города. Наибольшая интенсивность движения в летний период наблюдается вблизи перекрестков ул. Советская – ул. Чичканова и ул. Киквидзе – ул. Авиационная. Причем наибольший уровень шума был зарегистрирован вблизи перекрестка ул. Советская – ул. Московская – 82,3 дБА. Одной из причин увеличения уровня звука является движение по ул. Московская грузовых автомобилей.

Допустимый шум в жилой застройке составляет 70 дБА, превышение на жилотерритории г. Тамбова достигает 7,3–17%. При сопоставлении натуральных и нормативных данных были получены превышения шума на

всех исследуемых участках. Необходимо отметить, что наибольшее превышение уровня шума является на участке ул. Советская – ул. Московская (остановка «Московская улица», нечетная сторона ул. Советская).

Дополнительное исследование шумового фона проводилось в зимний период исследуемых участков (таблица 2). Точки замеров располагались в тех же местах, на которых ранее осуществлялся замер и оценка транспортного шума. Параметры размещения оборудования и порядок проведения измерений соответствовали требованиям.

Наибольшая интенсивность движения в зимний период наблюдается вблизи перекрестков ул. Советская – ул. Московская и ул. Киквидзе – ул. Авиационная. Наибольшие уровни шума были зарегистрированы вблизи перекрестков ул. Советская – ул. Чичканова и ул. Советская – ул. Московская – 82,2–82,7 дБА. На всех исследуемых участках уровень звука транспортного шума превышает санитарные нормы на 7–18%.

Результаты измерений уровня звука свидетельствуют о шумовом загрязнении жилотерриторий г. Тамбова. Выявлено увеличение транспортного шума в зимний период на 0,5–3% относительно летнего времени года. На всех исследуемых участках отмечено превышение уровней звука относительно нормативных значений, закрепленных в СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Таблица 1
Показатели уровня звука и интенсивности движения на УДС г. Тамбова в летний период

Table 1
Indicators of the sound level and traffic intensity at the Tambov UDS in summer

Место измерения	Интенсивность, авт/ч (межпиковое / пиковое время)	Эквивалентный уровень звука	
		Данные шумомера, дБА (межпиковое / пиковое время)	Превышение показателей санитарных норм (среднее), %
ул. Б. Васильева в районе дома № 4	720 / 780	75,4 / 75,9	8
перекресток ул. Советская – ул. Чичканова	2040 / 2460	80,4 / 80,7	15
ул. Киквидзе	1140 / 840	79 / 80,3	14
перекресток ул. Советская – ул. Московская	1920 / 2100	82,3 / 82,1	17
перекресток ул. Киквидзе – ул. Авиационная	2460 / 3120	77,6 / 76,5	11
перекресток ул. Елецкая – ул. Гастелло	1740 / 2820	75 / 75,2	7,3
перекресток ул. Советская – ул. Пензенская	2040 / 2460	79,3 / 79,9	13,7

Таблица 2
Показатели уровня звука и интенсивности движения на УДС г. Тамбова в зимний период

Table 2
Indicators of sound level and traffic intensity at the Tambov UDS in winter

Место измерения	Интенсивность, авт/ч (межпиковое / пиковое время)	Эквивалентный уровень звука	
		Данные шумомера, дБА (межпиковое / пиковое время)	Превышение показателей санитарных норм (среднее), %
ул. Б. Васильева в районе дома № 4	780 / 840	75,5 / 76,4	8,5
перекресток ул. Советская – ул. Чичканова	2100 / 2220	80,7 / 82,2	16
ул. Киквидзе	1200 / 1200	81,5 / 81,8	17
перекресток ул. Советская – ул. Московская	2220 / 2640	82,7 / 82,2	18
перекресток ул. Киквидзе – ул. Авиационная	2220 / 2820	81 / 80,6	15,5
перекресток ул. Елецкая – ул. Гастелло	1680 / 2340	76,4 / 77	7
перекресток ул. Советская – ул. Пензенская	2160 / 2340	80,6 / 80,9	15,4

На рисунках 1 и 2 приводятся данные измерений транспортного шума на наиболее показательных из приведенных выше участках УДС г. Тамбова.

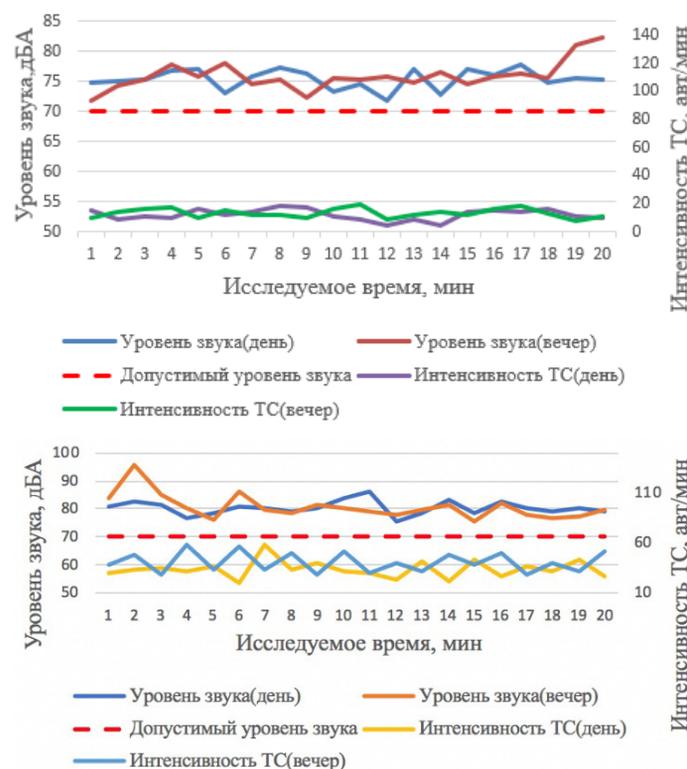


Рисунок 1 – Измерения уровня транспортного шума на перекрестке ул. Советская и ул. Чичканова (слева приведены данные замеров летом, справа – зимой)

Figure 1 – Measurements of the traffic noise level at the intersection of Sovetskaya and Chichkanova streets (the measurements on the left are for summer and the measurements on the right are for winter)

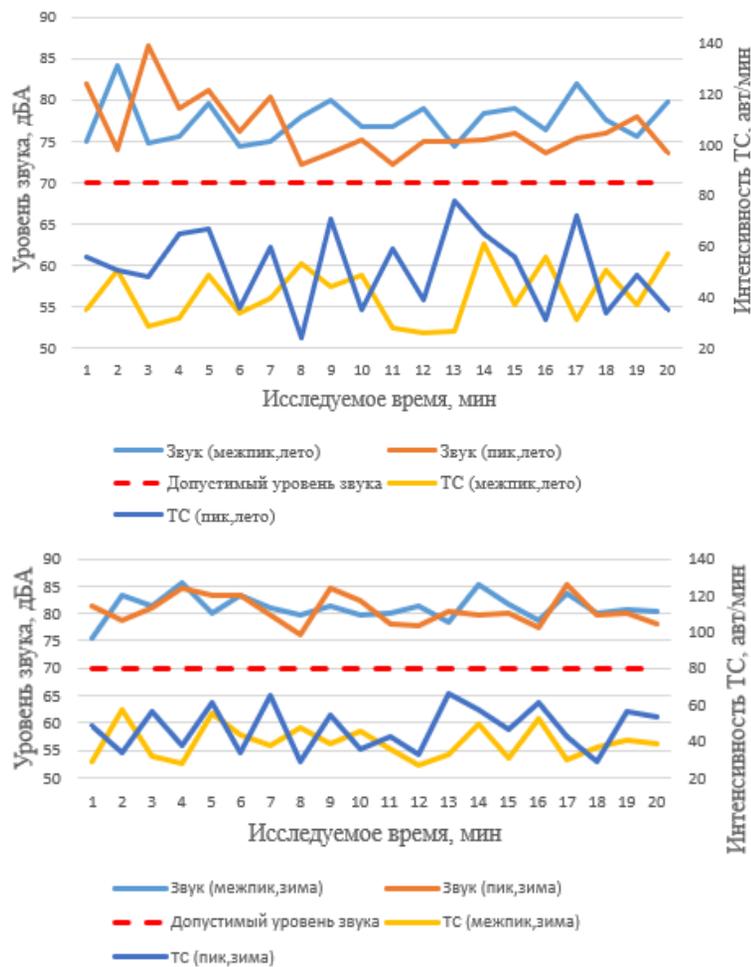


Рисунок 2 – Измерения уровня транспортного шума на перекрестке ул. Киквидзе и ул. Авиационная (слева приведены данные замеров летом, справа – зимой)

Figure 2 – Measurements of the traffic noise level at the intersection of Kikvidze and Aviatsionnaya streets (the measurements on the left are for summer and the measurements on the right are for winter)

Для выполнения прогнозных расчетов шумового режима территории необходимо знать уровень шума, производимого транспортным потоком автомобильной дороги. Исследования позволили установить, что уровень шума транспортного потока зависит от интенсивности движения и состава потока. Зависимость уровня шума от интенсивности движения может быть определена по номограмме (рисунок 3).

Исследования выявили необходимость контроля уровня превышения звука от транспортных средств, разработаны мероприятия по снижению звука на территории г. Тамбова.

Были определены некоторые факторы, влияющие на увеличение уровня звука на исследуемых участках: качество дорожного покрытия, неэффективная (с точки зрения уровня шума) организация дорожного движения на перекрестках и перегонах между ними, неоптимальное расположение объектов ин-

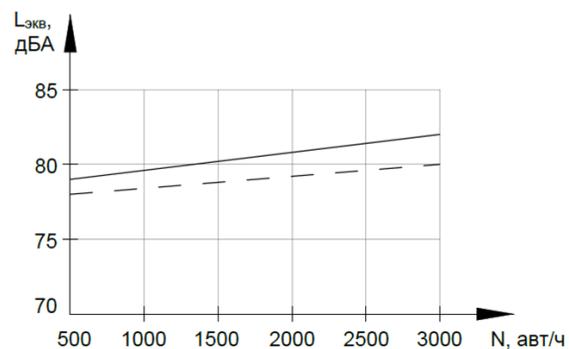


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности движения транспортных средств от уровня шума в летний (пунктирная линия) и зимний (прямая линия) период

Figure 3 – The dependence of the traffic intensity of vehicles on the noise level in the summer (dotted line) and winter (straight line) periods

фраструктуры, техническое состояние транспортного средства (неисправности выхлопной системы), эксплуатация автомобилей на зимней резине и др. Кроме этого, наличие близко расположенных зданий около дороги создает отражение резонансных частот от транспортных средств, что существенно влияет на увеличение параметра уровня шума.

Основной причиной превышения уровня шума в межпиковое время явилась более высокая скорость движения транспортных средств.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с полученными данными и анализом причин превышения норм транспортного шума на УДС города можно сформулировать следующие мероприятия, позволяющие снизить негативное воздействие автомобильного транспорта на окружающую среду:

- перемещение остановочного объекта на расстояние 5–6 м от края проезжей части;
- оптимизация движения общественного транспорта;
- строительство подземного пешеходного перехода;
- запрет поворота налево;
- замена подвижного состава общественного транспорта, используемого в городской среде, на более новый и менее шумный;
- снижение скоростного режима до 40 км/ч;
- озеленение проезжей части;
- соблюдение режима движения автомобиля;
- надлежащее состояние дорожного покрытия;
- техническое состояние автомобиля;
- соблюдение периодичности ТО и ТР для транспортных средств;
- проведение обязательных прогнозных расчетов уровня звука для новых проектных решений по реконструкции УДС и изменении организации дорожного движения.

В качестве градостроительных мероприятий по снижению уровня шума на УДС г. Тамбова можно выделить следующие:

- зональное разделение промышленных районов и селитебных территорий с помощью санитарно-защитных зон;
- уменьшение внутригородских транспортных потоков (автомобильного и железнодорожного транспорта) вблизи жилой застройки;
- максимально возможное исключение транзитных транспортных потоков с обеспечением объездных путей и др.

Комплекс указанных мероприятий позволит снизить уровень транспортного шума на УДС города в среднем на 5–15 дБА. Таким образом, разработка эксплуатационных мероприятий по снижению транспортного шума в г. Тамбове требует корректного определения наиболее уязвимых территорий и учета всех факторов в совокупности с расчетными и экспериментальными данными.

В результате исследования были получены данные, на основании которых разработаны мероприятия по снижению уровня шума на УДС г. Тамбова. Построена номограмма зависимости интенсивности движения транспортных средств от уровня шума, которая позволит без проведения натурных исследований (замеров) определять уровни звука.

Дальнейшее исследование причин увеличения уровня шума на УДС городов и мероприятий, способствующих снижению данного показателя, является перспективным научным и практическим направлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горин В.А., Клименко В.В., Полозюк В.А. Оценка транспортного шума в крупном городе и мероприятия по его снижению // Научные труды КубГТУ. 2019. № 2. С. 38–42.
2. Кенесариев У.И., Амрин М.К., Баялиева Р.А., Нұрлан А.Н., Сарсенбеков М.Н. Транспортный шум в крупных городах и его влияние на здоровье // Вестник Казахского национального медицинского университета. 2017. № 4. С. 228–231.
3. Beckenbauer T. Road Traffic Noise // Handbook of Engineering Acoustics. 2012. P. 367–392. DOI: 10.1007/978-3-540-69460-1_15.
4. Пугачев И.Н., Крикун С.Н. Исследование транспортного шума и транспортно-эксплуатационных качеств дорог в Магадане // Качество и жизнь. 2018. № 1(17). С. 66–70.
5. Картошкин А.П., Сысоева А.В. Исследование шумового давления в связи с увеличением автотранспортного комплекса в г. Архангельске // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3(74). С. 187–192.
6. Гагарин С.А., Гагарина О.В., Аль-Субари О.Х.А.С. Особенности оценки транспортного шума на кольцевых развязках г. Ижевска // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, № 1. С. 37–42.
7. Прожорина Т.И., Куролап С.А., Мамчик Н.П., Клепиков О.В., Каверина Н.В. Оценка риска здоровью населения г. Воронежа от воздействия транспортного шума // Естественные и технические науки. 2020. № 9 (147). С. 126–133.
8. Бойкив М.В., Житенко О.В., Дихтярь А.В. Исследование изменения уровня транспортного шума на улицах г. Львова // Наукові нотатки. 2018. № 62. С. 51–55.

9. Крикун С.Н. Расчет и экспериментальная оценка транспортного шума в городских условиях // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 3(89). С. 39–42.

10. Мальцев А.С., Нисина О.Е. Транспортный шум. Защита от шума // Молодежная наука в развитии регионов. 2021. Т. 1. С. 281–282.

11. Басков В.Н., Подгорнов А.И. Влияние грузовых автомобилей на общий уровень шума транспортных потоков и пути его снижения // Научная мысль. 2017. № 2. С. 60–62.

12. Abbes S., Hassine H., Barkallah M., Louati J., Haddar M. Experimental Study of Vehicle Noise and Traffic Pollution // Design and Modeling of Mechanical Systems – IV. 2020. P. 47-54. DOI: 10.1007/978-3-030-27146-6_6.

13. Лебедев О.А., Элькин Ю.И. Влияние на уровень транспортного шума и выбросов мероприятий по повышению эффективности использования наземного транспорта в г. Московский // Noise Theory and Practice. 2020. Т. 6, № 2 (20). С. 69–76.

14. Astrauskas T., Baltrėnas P., Januševičius T., Grubliauskas R. Louvred noise barrier for traffic noise reduction // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2021. Vol. 16. Issue 1. P. 140-154. DOI: 10.7250/bjrbe.2021-16.519.

15. Salhab Z., Amro H. Evaluation of Vehicular Noise Pollution in the City of Hebron, Palestine // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012. Vol. 2. Issue 6. P. 4307-4310. <https://www.researchgate.net/publication/345074393>.

16. Singh L.P. Prevalence of Traffic Noise in Jalandhar City // Ergonomics International Journal. 2017. Vol. 1. Issue 3. P. 1-4. DOI: 10.23880/EIJJ-16000126.

17. Prashanth N., Harinath S. Assessment of Noise Levels in Different Selected Study Areas of Bengaluru City-A Case Study // International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES). 2018. P. 1328-1332. <https://www.researchgate.net/publication/342259990>.

18. V. Ramakrishna, N. Saigiri, K. Chakribabu, Saliha Sultana, M. Dhanunjay Modeling and Prediction of Traffic Noise Levels // IOSR Journal of Engineering. 2021. Vol. 11, Issue 1. P. 04-13. <https://www.researchgate.net/publication/348677838>.

19. Sahu A.K., Pradhan P.K., Pradhan P.K., Nayak S.K., Pradhan M., Mohanty C.R. Evaluation and Modeling of Traffic Noise in Berhampur City, India // Fluctuation and Noise Letters. Vol. 19. Issue 04. 2020. DOI: 10.1142/S0219477520500443.

20. Tataru A.C., Stanci A. Study of Phonic Pollution Produced by Car Traffic in Petrosani // Acta Universitatis Cibiniensis Technical Series. 2019. Vol. 71. P. 72-75. DOI: 10.2478/aucts-2019-0014.

21. Ilić P., Nešković M.D., Stojanović B.L. Traffic Noise Levels in the City of Banja Luka // Quality of Life. 2018. Vol. 9(1-2). P. 20-26. DOI: 10.7251/QOL18010201.

22. Корчака А.В. О методах защиты городской среды от транспортного шума // Современные инновации. 2018. № 1 (23). С. 5–8.

23. Vnukova N., Reshetchenko A., Vergeles Yu. Assessment of the contribution of plantings of different functional purpose in reducing transport noise along motorway roads in urbanized areas // The Scientific Heritage. 2020. 46-1 (46): 40-45.

24. Заплетаев И.С., Лялякин В.В., Дормидонтова Т.В. Инновации по уменьшению транспортных шумов в городе // Евразийский союз ученых. 2019. № 4–3 (61). С. 32–35.

25. Армишева Г.Т., Бутузова А.А. Защита урбанизированных территорий от транспортного шума // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2017. Т. 1. С. 86–89.

26. Qinglu M., Zheng Z. Traffic State Evaluation Using Traffic Noise // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 120627 – 120646. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006332.

27. Бочаров А.А., Колесник А.Г., Соловьев А.В. Двухпараметрическая модель спектра транспортных шумов г. Томска // Акустический журнал. 2012. Т. 58, № 6. 762 с.

28. Benocci R., Molteni A., Cambiaghi M., Angelini F., Roman H.E., Zambon G. Reliability of Dynamap traffic noise prediction // Applied Acoustics. 2019. Vol. 156. P. 142-150. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.07.004.

REFERENCES

1. Gorin V.A., Klimenko V.V. Polozyuk V.A. Ocenka transportnogo shuma v krupnom gorode i meropriyatyya po ego snizheniyu [Assessment of traffic noise in a large city and measures to reduce it]. *Nauchnye trudy KubGTU*. 2019. 2: 38-42. (in Russian)

2. Kenesariyev U.I., Amrin M.K., Bayaliev R.A., Nyrjan A.N., Sarsenbekov M.N. Transportnyy shum v krupnyh gorodah i ego vliyaniye na zdorov'e [Traffic noise in major cities and its impact on health]. *Vestnik Kazahskogo nacional'nogo medicinskogo universiteta*. 2017. 4: 228-231. (in Russian)

3. Beckenbauer T. Road Traffic Noise. *Handbook of Engineering Acoustics*. 2012: 367-392. DOI: 10.1007/978-3-540-69460-1_15.

4. Pugachev I.N., Krikun S.N. Issledovanie transportnogo shuma i transportno-jekspluatatsionnykh kachestv dorog v Magadane [Research of transport noise and transport and operational qualities of roads in Magadan]. *Kachestvo i zhizn'*. 1 (17). 2018: 66-70. (in Russian)

5. Kartoshkin A.P., Sysoeva A.V. Issledovanie shumovogo davleniya v svyazi s uvelicheniem avtotransportnogo kompleksa v g. Arhangel'ske [Study of noise pressure in connection with the increase in the motor transport complex in Arkhangelsk]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019. 3 (74): 187-192. (in Russian)

6. Gagarin S.A., Gagarina O.V., Al'-Subari O.X.A.S. Osobennosti ocenki transportnogo shuma na kol'cevyyh razv'yazkah g. Izhevsk [Features of traffic noise assessment at Izhevsk roundabouts]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*. 2020. 30. 1: 37-42.

7. Prozhorina T.I., Kurolap S.A., Mamchik N.P., Klepikov O.V., Kaverina N.V. Ocenka riska zdorov'yu naseleniya g. Voronezha ot vozdeystviya transportnogo

shuma [Assessment of the health risk of the population of the city of Voronezh from the impact of traffic noise]. *Estestvenny'e i tekhnicheskie nauki*. 2020. 9(147): 126-133. (in Russian)

8. Bojkiv M.V., ZHitenko O.V., Dihtyar' A.V. Issledovanie izmeneniya urovnja transportnogo shuma na ulicah g. L'vova [Study of changes in the level of traffic noise on the streets of the city of Lviv]. *Naukovi notatki*. 2018. 62: 51-55. (in Russian)

9. Krikun S.N. Raschet i jeksperimental'naja ocenka transportnogo shuma v gorodskih usloviyah [Calculation and experimental evaluation of traffic noise in urban conditions]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2019. 3 (89): 39-42. (in Russian)

10. Mal'cev A.S., Nisina O.E. Traffic noise. [Noise protection]. *Molodezhnaya nauka v razvitii regionov*. 2021. 1: 281-282. (in Russian)

11. Baskov V.N., Podgornov A.I. Vliyanie gruzovyh avtomobilej na obshhij uroven' shuma transportnyh potokov i puti ego snizheniya [The impact of trucks on the overall noise level of traffic flows and ways to reduce it]. *Nauchnaya my'slj*. 2017. 2: 60-62. (in Russian)

12. Abbas S., Hassine H., Barkallah M., Louati J., Haddar M. Experimental Study of Vehicle Noise and Traffic Pollution. *Design and Modeling of Mechanical Systems – IV*. 2020: 47-54. DOI: 10.1007/978-3-030-27146-6_6.

13. Lebedev O.A., El'kin Yu.I. Vliyanie na urovni transportnogo shuma i vybrosov meropriyatij po povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya nazemnogo transporta v g. Moskovskij [Impact on traffic noise and emissions levels of measures to improve the efficiency of land transport use in the city of Moskovsky]. *Noise Theory and Practice*. 2020. 6 2 (20): 69-76. (in Russian)

14. Astrauskas T., Baltrėnas P., Januševičius T., Grubliauskas R. Louvred noise barrier for traffic noise reduction. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2021. 16. 1: 140-154. DOI: 10.7250/bjrbe.2021-16.519.

15. Salhab Z., Amro H. Evaluation of Vehicular Noise Pollution in the City of Hebron, Palestine. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2012. 2. 6: 4307-4310. <https://www.researchgate.net/publication/345074393>.

16. Singh L.P. Prevalence of Traffic Noise in Jalandhar City. *Ergonomics International Journal*. 2017. 1. 3: 1-4. DOI: 10.23880/EIJ-16000126.

17. Prashanth N., Harinath S. Assessment of Noise Levels in Different Selected Study Areas of Bengaluru City-A Case Study. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES)*. 2018. P. 1328-1332. <https://www.researchgate.net/publication/342259990>.

18. V. Ramakrishna, N. Saigiri, K. Chakribabu, Saliha Sultana, M. Dhanunjay Modeling and Prediction of Traffic Noise Levels. *IOSR Journal of Engineering*. 2021. 11. 1: 04-13. <https://www.researchgate.net/publication/348677838>.

19. Sahu A.K., Pradhan P.K., Pradhan P.K., Nayak S.K., Pradhan M., Mohanty C.R. Evaluation and Modeling of Traffic Noise in Berhampur City, India. *Fluctuation and Noise Letters*. 2020. 04. DOI: 10.1142/S0219477520500443.

20. Tataru A.C., Stanci A. Study of Phonic Pollution Produced by Car Traffic in Petrosani. *Acta Universitatis Cibiniensis Technical Series*. 2019. 71: 72-75. DOI: 10.2478/aucts-2019-0014.

21. Ilić P., Nešković M.D., Stojanović B.L. Traffic Noise Levels in the City of Banja Luka. *Quality of Life*. 2018. Vol. 9(1-2). P. 20-26. DOI: 10.7251/QO-L1801020I.

22. Korchaka A.V. O metodah zashchity gorodskoj sredy ot transportnogo shuma [Methods of protecting the urban environment from traffic noise]. *Sovremennye innovacii*. 2018. 1 (23): 5-8. (in Russian)

23. Vnukova N., Reshetchenko A., Vergeles Yu. [Assessment of the contribution of plantings of different functional purpose in reducing transport noise along motorway roads in urbanized areas]. *The Scientific Heritage*. 2020. 46-1 (46): 40-45.

24. Zapletaev I.S., Lyalyakin V.V., Dormidontova T.V. Innovacii po umen'sheniyu transportnyh shumov v gorode [Innovations to reduce traffic noise in the city]. *EvrAzijskij soyuz uchenyh*. 2019. 4-3 (61): 32-35. (in Russian)

25. Armisheva G.T., Butuzova A.A. Zashhita urbanizirovannyh territorij ot transportnogo shuma [Protection of urbanized areas from traffic noise]. *Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. 2017. 1: 86-89. (in Russian)

26. Qinglu M., Zheng Z. Traffic State Evaluation Using Traffic Noise. *IEEE Access*. 2020. 8: 120627 – 120646. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006332.

27. Bocharov A.A., Kolesnik A.G., Solov'ev A.V. Dvuhparametricheskaja model' spektra transportnyh shumov g. Tomska [Two-parameter model of the transport noise spectrum in Tomsk]. *Akusticheskij zhurnal*. 2012. 58. 6: 762. (in Russian)

28. Benocci R., Molteni A., Cambiagli M., Angelini F., Roman H.E., Zambon G. Reliability of Dynamap traffic noise prediction. *Applied Acoustics*. 2019. 156: 142-150. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.07.004.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гуськов А.А. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовал в разработке следующих разделов: аннотация, введение, результаты, обсуждение и заключение. Общее научное руководство статьей.

Степанов Н.А. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовал в разработке следующих разделов: введение, материалы и методы, результаты, обсуждение и заключение. Проведение экспериментальных исследований.

Анохин С.А. Вклад в общую работу составил 1/3 от общего объема статьи. Участвовал в разработке следующих разделов: материалы и методы, результаты, обсуждение и заключение. Редактирование и перевод статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Artem A. Guskov made a contribution of 1/3 to the overall work of the article, participated in the

development of the following sections as an abstract, introduction, results, discussion and conclusions, general scientific guidance of the article.

Nikita A. Stepanov made a contribution of 1/3 to the overall work of the article, participated in the development of the following sections as an introduction, materials and methods, results, discussion and conclusions, conducting experimental studies.

Sergey A. Anokhin made a contribution of 1/3 to the overall work of the article, participated in the development of the following sections as materials and methods, results, discussion and conclusions, editing and translation of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Степанов Никита Алексеевич – магистрант кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

Анохин Сергей Александрович – ст. преп. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

AUTHOR INFORMATION

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

Nikita A. Stepanov – Master's Student of the Engineering and Technology of Road Transport Department, Tambov State Technical University.

Sergey A. Anokhin – Senior Lecturer of the Engineering and Technology of Road Transport Department, Tambov State Technical University.

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 691.342:628.33.8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>

ПРИМЕНЕНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА

И.Л. Чулкова¹, О.Е. Смирнова², А.В. Красова²

¹ «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (СибАДИ),
г. Омск, Россия;

² «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия

le5@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4451-2297>
smirnova.olj@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5067-2417>
krasova1981@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2963-8783>

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассмотрена актуальная проблема утилизации техногенных отходов (осадка сточных вод). По литературным данным определены и рассмотрены возможные направления применения осадков сточных вод в производстве строительных материалов. Особое внимание уделено предложенному варианту систематизации материалов, в основу которого положена зависимость агрегатного состояния осадка от вида строительного материала. Предлагается использовать осадки сточных вод в качестве добавки, позволяющей улучшить подвижность бетонной смеси.

Методы и материалы. Исследования основных свойств сырьевых компонентов и бетона на их основе определяли с помощью стандартных методик и требований национальных стандартов. Вещественный и химический состав осадков, их физико-механические характеристики определены на базе лаборатории завода химконцентратов (г. Новосибирск).

Результаты. В результате проведенных экспериментальных работ определено оптимальное процентное содержание осадка сточных вод в составе тяжелого бетона, а также отношение химической модифицирующей добавки, исследован оптимальный состав бетона.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных работ установлено влияние введения в состав бетона модифицированных пластифицирующими добавками осадков сточных вод. Установлено, что осадок сточных вод целесообразно применять в тяжелых бетонах в качестве корректирующей добавки, без снижения прочностных характеристик. В дальнейших исследованиях предполагается решить вопросы применения золы от сжигания осадка сточных вод, ее влияния на реологические свойства бетонной смеси; исследовать зависимость между химическим составом осадков и физико-механическими свойствами строительного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ слова: бетон, добавка, осадок сточных вод, химический состав, прочность

Статья поступила в редакцию 01.02.2021; одобрена после рецензирования 05.10.2021; принята к публикации 31.10.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Чулкова И.Л., Смирнова О.Е., Красова А.В. Применение осадков сточных вод в производстве бетона // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 5(81). С. 566-575. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>

© Чулкова И.Л., Смирнова О.Е., Красова А.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>

USE OF SEWAGE SLUDGE IN CONCRETE INDUSTRY

*Irina L. Chulkova*¹, *Olga E. Smirnova*², *Anna V. Krasova*²

¹*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia*

²*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN), Novosibirsk, Russia*

le5@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4451-2297>

smirnova.olj@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5067-2417>

krasova1981@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2963-8783>

ABSTRACT

Introduction. *The article deals with the actual problem of disposal of industrial waste (sewage sludge). According to the literature data, possible directions of the use of sewage sludge in the production of building materials are identified and considered. Special attention is paid to the proposed variant of systematization of materials, which is based on the dependence of the aggregate state of the sediment on the type of building material. It is proposed to use sewage sludge as a complex additive to improve rheological properties at all stages of heavy concrete hardening.*

Methods and materials. *Studies of the basic properties of raw materials and concrete based on them were determined using standard methods and the requirements of national standards. The material and chemical composition of the sediments, their physical and mechanical characteristics were determined on the basis of the laboratory of the plant of chemical concentrates (Novosibirsk).*

Results. *As a result of the experimental work, the optimal percentage of sewage sludge in the composition of heavy concrete was determined, as well as the ratio of the chemical modifying additive, the optimal composition of concrete was investigated.*

Conclusion. *As a result of the experimental work, the influence of the introduction of sewage sludge modified with plasticizing additives into the concrete composition was established. It has been established that sewage sludge is advisable to use in heavy concrete as a corrective additive without reducing the strength characteristics. In further studies, it is planned to solve the problems of structure formation and study of the interface between the phases of sewage sludge in the composition of concrete; to investigate the relationship between the chemical composition of precipitation and the physical and mechanical properties of a building material.*

KEYWORDS: *concrete, additive, sewage sludge, chemical composition, strength*

The article was submitted 01.02.2021; approved after reviewing 05.10.2021; accepted for publication 31.10.2021.

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: Chulkova I.L., Smirnova O.E., Krasova A.V. Use of sewage sludge in concrete industry. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (5): 566-575. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>

© Chulkova I.L., Smirnova O.E., Krasova A.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных эко-проблем мегаполисов является загрязнение рек и водоемов техногенными отходами, такими как сточные воды, несмотря на то что законодательными актами РФ запрещен сброс неочищенных сточных вод в водные объекты [1]. Переработка и обезвреживание осадка (далее ОСВ – осадок сточных вод) на очистных сооружениях, образовавшегося после очистки поверхностных сточных вод, – актуальный экологический вопрос. Целью работы является исследование целесообразности применения осадков сточных вод в производстве бетонных смесей, а также подбор оптимального состава бетона на основе ОСВ.

Обработка и утилизация осадков сточных вод является очень острой проблемой для крупных городов. Проведенный анализ отчетных данных о составе поверхностных сточных вод на территориях крупных агломераций выявляет повышенную степень их загрязнения.

Применение осадков сточных вод возможно при производстве [3, 4, 5]:

- керамзитового гравия (введение механически обезвоженных осадков сточных вод в количестве 3–5% к массе глины вместо традиционной добавки – опилок);
- стеновой керамики в качестве корректирующей добавки;
- бетона (заполнитель для бетона в виде гранул из смеси осадка с сухой золой ТЭЦ, молотой известью и гипсом);
- асфальтобетона;
- тяжелого, ячеистого бетона (в качестве добавки 0,2–0,5% по массе согласно литературным данным).

Достаточно часто осадок сточных вод применяют в качестве добавки в сырьевую массу при изготовлении керамических изделий [6]. Известный факт, что для улучшения свойств глинистого сырья при производстве керамических материалов вводят корректирующие добавки для достижения различных оптимальных параметров в зависимости от качества сырья и технологии производства материалов [3, 6]. В основном введением добавок пытаются улучшить формующую способность, а также сушильные и обжиговые свойства.

Использование осадков помимо очевидной актуальности представляет интерес, так как их состав и дисперсность предполагает определенное влияние на реологические характеристики глины. Вещественный и химический состав осадков сточных вод оказывает воздействие на процессы спекания при обжиге

керамической массы. Предполагается также возможность образования при обжиге различных соединений, которые могут сдерживать и уменьшать влияние тяжелых металлов в составе осадков сточных вод.

Решая экопроблему при утилизации осадков сточных вод в производстве строительных материалов, появляется возможность целенаправленного регулирования свойств строительной керамики для производства изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами. Осадки обладают достаточно высокой адсорбцией, которая позволяет корректировать формовочные и сушильные показатели шихты [7]. При этом стоит отметить, что введение золы от сжигания осадка сточных вод понижает пластичность при значительном увеличении формовочной влажности керамической массы с 24,5 до 29,5%.

Согласно анализу литературных данных известно применение осадков, образующихся в результате очистки смеси городских и промышленных сточных вод, при изготовлении керамики (кирпич, черепица) [6, 8, 9, 10, 11]. При определенных соотношениях добавка таких осадков не вызывает снижения свойств получаемых керамических материалов. Также применяют осадки, содержащие ионы тяжелых металлов, при изготовлении кирпича, при этом осадок обезвоживают до 60–80% влажности и добавляют в сырьевую смесь на стадии ее гомогенизации в количестве до 5% [9]. Встречается способ [10] использования осадка при изготовлении добавок для регулирования свойств бетонных смесей, результатом является улучшение реологических показателей смесей. Известен способ подготовки вспучивающего компонента на основе обезвоженного осадка сточных вод кожевенных предприятий [11].

В Индии разработан способ применения отработанного асфальтового покрытия путем дробления его до 10 мм, 12,5 мм и 20 мм с добавлением 5% раствора золы от сжигания осадков сточных вод, техническим результатом которого является повышение прочностных характеристик бетона по сравнению с обычным заполнителем [12]. В Китае проводятся исследования по изучению механических свойств бетона, в котором применяется зола от шлама сточных вод в качестве частичной замены цемента [13].

На основании литературных данных и направлений исследования предлагается вариант систематизации материалов с применением осадков сточных вод (рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация утилизации осадков в производстве строительных материалов

Figure 1 – Classification of disposal of sludge in the production of building materials

В основу предлагаемой классификации положен признак агрегатного состояния ОСВ: твердое (зола от сжигания ОСВ, влажность 0,4–0,6%), пастообразное (осадок берется с отвалов, влажность 68–75%) и жидкое (осадок из первичных отстойников, влажность 92–96%).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На сегодняшний день не приведено теоретических основ, нет технологических приемов по переработке осадков поверхностных сточных вод с учетом требований по экологической и химической безопасности производства строительных материалов с добавкой сточных вод. Эти факторы сдерживают применение осадков поверхностных сточных вод в промышленности строительных материалов.

Предлагается использовать осадок сточных вод в качестве добавки, влияющей на подвижность бетонной смеси, а также позволяющей уменьшать водоцементное отношение и получать образцы с эксплуатационными характеристиками, соответствующими требованиям нормативных технических документов. В этом случае появляется возможность целенаправленно регулировать свойства бетонной

смеси и изготавливать материалы с заданными параметрами.

Для решения этих вопросов были исследованы свойства сырьевых компонентов, определены оптимальные соотношения осадка сточных вод в составе бетонной смеси, исследована возможность введения модифицированных пластифицирующими добавками осадков в бетон.

Осадки сточных вод – это водная суспензия, содержащая минеральные и органические вещества, разные по составу и происхождению, которая получается из сточных вод путем механической, биологической или реагентной очистки, при концентрации полидисперсной твердой фазы по объему 0,5–10% [14, 15, 16].

Осадки представляют собой труднообезвоживаемые полидисперсные суспензии, в которых влага находится в химической, физико-химической и физико-механической связи с твердыми частицами, а также в свободном виде. Объем осадков сточных вод находится в пределах 5% (иногда до 40%) от общего объема всех подвергаемых обработке поверхностных сточных вод. Процентное содержание по объему зависит от применяемого способа очистки и показателя влажности осадка. Влажность осадков высокая и составляет порядка

85% для предприятий стройиндустрии, и 99% влажностью характеризуется активный ил сооружений биологической очистки [17, 18, 19].

В исследовании применяется осадок поверхностных сточных вод, который берется с первичных отстойников. Такой осадок обладает влажностью 92–96%, большой неоднородностью состава, является суспензией серого цвета с кислым запахом. Размерность частиц осадка от 10–12 мм и больше до частиц коллоидной и молекулярной дисперсности. Температура осадка 12–20 °С, а показатель pH находится в пределах 6–8 ед. [20, 21].

При анализе применения осадка в качестве добавки рассмотрен его химический и гранулометрический состав. Наибольшую долю сухого вещества осадка из отстойников (65–78%), а также активного ила (72–76%) составляют органические соединения, порядка 45–48%, при этом жиры и углеводы составляют до 15 и 5% соответственно [22, 23].

Элементарный состав по сухому веществу осадка сточных вод, % по массе: С 35,0–87,5%, Н 4,8–8,9%, S 0,3–2,8%, N 1,7–8,3%, O 7,5–35,9%.

Для активного ила элементарный состав по сухому веществу в % по массе содержит: С 43,4–76,2%, Н 5–8,2%, S 0,9–2,7, N 3,3–9,8%, O 12,5–43,2% [24, 25, 26, 27, 28].

Общий химический состав осадков, %, к абсолютно сухому веществу приведен в таблице 1.

Химический состав минеральной части осадков, % к абсолютно сухому веществу приведен в таблице 2.

В работе использовался портландцемент (портландцемент со шлаком ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б) соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Применялся щебень из альбитофира фракции от 5 до 20 мм, ООО «Усть-Каменский карьер», без содержания глины в комках. Щебень марки по прочности или дробимости М1400, марка по истираемости И1. Зерна слабых пород отсутствуют. Морозостойкость щебня (марка F300). Щебень имеет насыпную плотность 1430 кг/м³. Устойчивость структуры щебня против распадов, %: 1,2. Аэфф естественных радионуклидов, Бк/кг: 95,3±12,5.

Химический состав щебня: SiO₂ – 48–65%, Al₂O₃ – 15–18%, CaO – 3,5–10,5 %, MgO – 2,1–7,2 %, SO₃ – 0,38–1,01 %, Fe₂O₃ – 7,0–12,5%.

В работе в качестве мелкого заполнителя применялся песок АО «Левобережный песчаный карьер» с. Марусино. Основные свойства песка определялись с учетом требований нормативно-технических документов: содержание пылевидных и глинистых частиц – 1,2%; насыпная плотность – 1550 кг/м³; влажность – 3,6%; глина в комках – отсутствует; удельная, эффективная активность естественных радионуклидов в песке ЕРН (Аэфф) – 49,6 Бк/кг. Модуль крупности (Мк) составляет 1,83 — мелкий песок.

В качестве модификаторов применяли пластифицирующие добавки «Штайнберг» F-10, S-3Н, GROS-63 МА и добавку GLENIUM SKY 591.

Таблица 1
Химический состав осадков, %

Table 1
Chemical composition of precipitation, %

Тип осадков	Зола	Альфа-целлюлоза	Гемиллюлоза	Белки	Жиры	Общий азот	Фосфор
Первичные сырые ОСВ	15–35	5,5–5	5–7	15–21	18–26	3,2–3,8	1,4–2,5

Таблица 2
Химический состав минеральной части осадков, %

Table 2
Chemical composition of the mineral part of sediments, %

Тип осадков	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	ZnO	CuO	NiO	Cr ₂ O ₃
Первичные сырые ОСВ	28,4–55,9	0,3–18,9	3,0–13,9	11,8–35,9	2,1–4,3	0,7–3,4	0,8–4,2	1,8–7,5	0,1–0,6	0,1–0,8	0,2–2,9	0,8–3,1

Таблица 3
Свойства бетонных образцов с учетом варьирования доли добавки осадка сточных вод

Table 3
Properties of concrete specimens taking into account the variation in the proportion of the addition of sewage sludge

№ образца	Отклик $Y_1, R_{сж}$ (МПа) цемент: осадок сточных вод				Отклик Y_2, ρ_m (кг/м ³) цемент: осадок сточных вод			
	100:0,1	100:0,3	100:0,6	100:1	100:0,1	100:0,3	100:0,6	100:1
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
1	40,6	41,5	43,1	40,6	2343	2367	2406	2456
2	40,5	39,7	41,2	42,4	2321	2355	2409	2469
3	40,8	40,5	40,8	41,1	2340	2357	2414	2445

Для приготовления бетонной смеси произведен подбор состава: портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б (ПЦ 400-Д20) – 300 кг/м³; щебень – 1165 кг/м³; песок, – 736 кг/м³, воды – 168 л/м³. Водоцементное отношение – 0,56. Показатели прочности при сжатии ($R_{сж}$) стандартного бетонного образца в возрасте 3 сут. – 22,2 МПа; 7 сут. – 30,3 МПа; 28 сут. – 40,3 МПа.

Для определения влияния модифицированных пластифицирующими добавками осадков сточных вод на состав бетона был применен дисперсионный анализ. По фактору X_1 была взята доля введения осадков сточных вод, % по массе. Долю введения осадка сточных вод варьировали на 4 уровнях. В качестве откликов рассматривали свойства бетонных образцов: прочность при сжатии – Y_1 , среднюю плотность – Y_2 .

Далее был составлен план эксперимента и проведены испытания бетонных образцов с варьированием доли добавки осадка сточных вод (таблица 3).

В результате дисперсионного анализа необходимо было оценить линейные эффекты фактора на отклики эксперимента. Для этого решали уравнение

$$SS_{\text{общ.}} = SS_X + SS_{\text{ост}}$$

где $SS_{\text{общ.}}$ – общая сумма квадратов для фактора X ; SS_R – сумма квадратов отклонений для фактора X ; $SS_{\text{ост}}$ – остаточная сумма квадратов, так называемая характеристика ошибки опыта.

Значимость факторов оценивалась по расчетному показателю критерия Фишера. Результаты, которые получили в результате однофакторного дисперсионного анализа, приведены на рисунке 2.

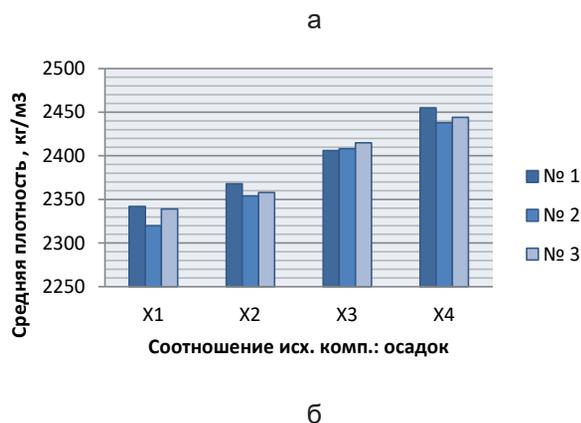
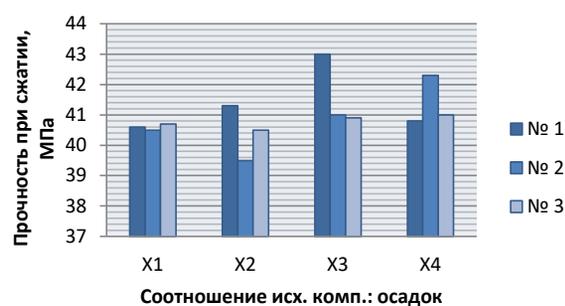


Рисунок 2 – Влияние осадка на свойства бетонной смеси

Figure 2 – Effect of sediment on concrete properties

На рисунке 2, а варьирование в сторону увеличения с 0,1 до 1% массовой доли осадка (от содержания цемента) приводит к увеличению средней плотности бетонных образцов, но значение не превышает 2500 кг/м³. Согласно рисунку 2, б показатели прочности на сжатие бетонных образцов составляют более 32,7 МПа прочности в возрасте 28 сут и соответствуют нормативным требованиям.

Таблица 4
Составы бетона с модифицированным осадком сточных вод

Table 4
Concrete compositions with modified sewage sludge

№	Компоненты смеси на 1 м ³				Добавка			
	Цемент, кг	Щебень, кг	Песок, кг	Вода, л	Пластификатор	Дозировка, % от массы цемента	Осадок сточных вод, л	Дозировка, % от массы цемента
1	300	1165	736	168	F-10	1	1,8	0,6
2	300	1165	736	168	S-3H	1	1,8	0,6
3	300	1165	736	168	GROS-63 MA	1	1,8	0,6
4	300	1165	736	168	SKY 591	1	1,8	0,6

Проведенные исследования показали, что осадок сточных вод может быть использован в качестве добавки при производстве тяжелого бетона для соответствующей области применения, оптимальным соотношением введения осадка является 0,6% от массы цемента.

Для повышения прочности, подвижности с П2 до П5 (что соответствует товарному бетону) осадок сточных вод модифицирован суперпластификатором. Осадок сточных вод перемешивался с пластификатором до получения однородной массы, далее вводился в бетонную смесь. Результаты представлены в таблице 4.

На рисунке 3 график изменения прочности бетона наглядно показывает, как влияет модифицирование осадка сточных вод (0,6% от массы цемента) разными пластификаторами на прочность образцов бетона.

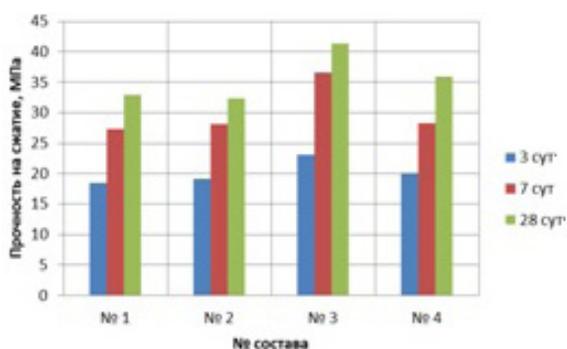


Рисунок 3 – Влияние модифицирующих добавок на прочность материала

Figure 3 – Influence of modifying additives on material strength

Определена осадка конуса для бетонной смеси на основе ОСВ и четырех видов пластификаторов (рисунок 4).

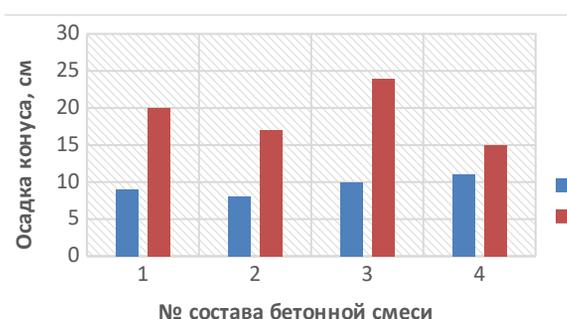


Рисунок 4 – Влияние модифицирующих добавок на подвижность бетонной смеси (1-й ряд – контрольный состав, без введения ОСВ; 2-й ряд – состав с ОСВ и пластификатором)

Figure 4 – The influence of modifying additives on the mobility of the concrete mixture (row 1 - control composition, without introducing sediment, row 2 - composition with sediment and plasticizer)

Установлено, что при модифицировании ОСВ добавкой №3 (GROS-63 MA, производство Штайнберг-Хеми) подвижность бетонной смеси увеличилась с П2 до П5 (осадка конуса составила 24 см). Агрегатное состояние осадков сточных вод пастообразное, оно способствует повышению пластичности бетонной смеси. Таким образом в процессе модифицирования пластифицирующей добавкой этот эффект усиливается.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагается вариант систематизации материалов с применением осадков сточных вод, в основу которого положена зависимость агрегатного состояния осадка от вида строительного материала.

Установлено, что осадок сточных вод возможно применять в тяжелых бетонах в качестве корректирующей добавки, без снижения прочностных характеристик.

Установлено оптимальное соотношение ОСВ, равное 0,6% по массе, дальнейшее увеличение содержания ОСВ приводит к снижению прочностных характеристик смеси.

По результатам экспериментальных исследований подобран рациональный состав бетона: портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б (ПЦ 400–Д20) – 300 кг/м³; щебень – 1165 кг/м³; песок – 736 кг/м³; осадок сточных вод – 1,8 л/м³; вода – 168 л/м³.

Разработан состав бетона на основе модифицирующей добавки (осадок сточных вод + химическая добавка Штайнберг GROS-63 МА), обладающий в возрасте 3 сут прочностью при сжатии – 23,1 МПа, в возрасте 28 сут прочностью при сжатии – 41,4 МПа. Добавление модифицирующей добавки (осадок сточных вод + химическая добавка Штайнберг GROS-63 МА) влияет на подвижность бетонной смеси, которая увеличивается с П2 до П5.

В дальнейших исследованиях предполагается решить вопросы применения золы от сжигания осадка сточных вод, ее влияния на реологические свойства бетонной смеси; исследовать зависимость между химическим составом осадков и физико-механическими свойствами бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвичева А.В., Доскина Э.П., Москвичева Е.В. Осадки сточных вод или отходы: вопросы правового регулирования // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 4. С. 18–22.
2. TikhareliV D, TikhareliV D Investigation of Mechanism of Action of Modifying Admixtures Based on Products of Petrochemical Synthesis on Concrete Structure // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 262 (2017) 012007, doi:10.1088/1757-899X/262/1/012007
3. Поляков Г.Н., Святская Л.И., Левит И.М. Внедрение технологии производства керамического кирпича с добавкой золы от сжигания осадков сточных вод // Строительные материалы. 2002. № 10. С. 28–29.
4. Pimenov A.T., Smirnova O.E., Ottochko S.Y. Use of metallurgical slags in mortar production // In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018: 012023.
5. Обезвреживание сточных вод в промышленности бетона (Великобритания) // Бюллетень иностранной научно-технической информации по строительству, архитектуре, строительным материалам, конструкциям и жилищно-коммунальной сфере. 2015. № 3. С. 14–15.
6. Кучерова Э.А., Паничев А.Ю. Введение осадков сточных вод гальванических производств в массы стеновой керамики // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1992. № 5. С. 16–22.
7. Цыбина А.В., Дьяков М.С., Вайсман Я.И. Состояние и перспективы обработки и утилизации осадков сточных вод // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 56–61.
8. Дрегуло А.М. Исследование составов тяжелых металлов и фосфатов в полимерных веществах биомассы активных илов // Вода и экология: проблемы и решения изд-во: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2020. № 3(83). С. 8–13.
9. Борзова Ю.С. Использование экологически безопасных технологий очистки сточных вод // YoungScience. 2014. № 1. С. 16–17.
10. Белюченко И.С. Осадки сточных вод, их очистка и использование // Экологический вестник Северного Кавказа. 2016. Т. 2016. № 1. С. 82–95.
11. Валеев В.Х., Сомова Ю.В., Сомов В.А. Исследование возможности использования осадков сточных вод очистных сооружений в качестве удобрения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. № 3(14). С. 69–73.
12. Prabhanjan N., Yadav G.S., Sahithi G., Sravanthi B. and Tipraj B. Assesment to Increase the Mechanical Properties of used Ballast by EDTA Solution as a Construction // Material International Journal of Recent Technology and Engineering 5 (2020) pp. 157-160.
13. Doh S. I., Muhammad Aizat A., Chin S. C., Jing G. Q. Mechanical properties of concrete containing microwaved sewage sludge ash as partial cement replacement // National Colloquium on Wind & Earthquake Engineering IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 244 (2019) 012027 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/244/1/012027
14. Bahadori, H., & Hosseini, P. Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (Investigation on concrete properties) // Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 18: 416–425, doi:10.3846/13923730.2012.698912
15. Ribeiro, A. Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials // Fiúza, A.C.M., Castro, F.G., Silva, M.L., Dinis, J.P., Meixedo, M.R. / Composite Structures Volume 105, November 2013, p. 300-310, doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.05.023
16. Vyboishchik A V, Kostyunina I L Contemporary methods of production of pigments obtained from non-ferrous industrial waste // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) C. 012003, doi:10.1088/1757-899X/451/1/012003
17. Залетова Н.А., Воронов Ю.В. Новые технологии для решения современных задач очистки сточных вод // Вестник МГСУ. 2012. № 2. С. 109–111.
18. Васильев С.М., Домашенко Ю.Е., Ляшков М.А. Определение зон разбавления при повторном использовании сточных вод на оросительных системах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 2 (22). С. 17–29.
19. Yu S, Wang B, Pan Y, Chen Z, Meng F, Duan S, Cheng Z, Wu L, Wang M and Ma W 2018 Cleaner production of spherical nanostructure chromium oxide (Cr₂O₃) via a facile combination membrane and hydrothermal approach // Journal of Cleaner Production, 176, p. 636-644, doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.108

20. Меркина И.В. Утилизация твёрдых отходов источников вод в программе предотвращения загрязнения окружающей среды (Австралия) // ВНИИИТ-ПИ. Строительство и архитектура. Сер. Инженерное обеспечение объектов строительства и ЖКХ: экспресс-информ. 2007. № 4. С.77–78.

21. Sokolov P. E., Sentenberg S. A. Application of clusterization algorithms for building materials classification on radioactivity in R // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 687 (2019), С. 022003, doi:10.1088/1757-899X/687/2/022003 1

22. Крашенинникова С.В. Влияние урбанизированных территорий на формирование поверхностного стока. Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2008. № 10(4). С.119–121.

23. Mestnikov A E, Fedorov V I Porous filler from foam-zeolite and light concretes based on it for conditions of the Arctic and the North//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 687 (2019), С. 022027, doi:10.1088/1757-899X/687/2/022027

24. Шонина Н.А. Водоснабжение и водоотведение в условиях Крайнего Севера // Сантехника. 2012. № 5. С. 15–24.

25. Амбросова Г.Т., Кругликова А.В., Мансуров Р.Ш., Рафальская Т.А., Тимофеев С.Л. Влияние природно-климатических факторов на эффективность работы открытых очистных сооружений канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 4. С. 48–59.

26. Горбачева Т.Т., Майоров Д.В. Пробное коагулирование осветленных коммунальных стоков в реагентном удалении фосфора // Вестник современных исследований. 2018. № 12.1 (27). С. 504–508.

27. Randall, A. A, Chen, Y. and McCue, T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid // Water Research, 2014, vol. 38, issue 1, pp. 27–36. doi: 10.1016/j. watres.2003.08.025.

28. Setegn, S. G. Water resources management for sustainable environmental public health. // Setegn, S. G., Donoso, M. C. (eds.) /Sustainability of integrated water resources management: water governance, climate and ecohydrology. Cham: Springer, 2015: 275–287. doi: 10.1007/978-3-319-121949_15.

REFERENCES

1. Moskvicheva A.V., Doskina E.P., Moskvicheva E.V. Osadki stochnyh vod ili othody: voprosy pravovogo regulirovaniya [Sewage sludge or waste: the issues of legal regulation]. *Vodosnabzhenie i sanitarnayatekhnika*, 2016, 4: 18-22. (in Russian)

2. Tukhareli V.D, Tukhareli V.D. Investigation of Mechanism of Action of Modifying Admixtures Based on Products of Petrochemical Synthesis on Concrete Structure. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 262 (2017) 012007, doi:10.1088/1757-899X/262/1/012007

3. Polyakov G.N., Svyatskaya L.I., I.M. Levit I.M. Vnedrenie tekhnologii i proizvodstva keramicheskogo kirpicha s dobavko jzolyotshiganiyaosadkovstochnyhvod [Introduction of technology for the production of

ceramic bricks with the addition of ash from the combustion of sewage sludge]. *Stroitel'nyematerialy*, 2002, 10: 28-29. (in Russian)

4. Pimenov A.T., Smirnova O.E., Ottochko S.Y. Use of metallurgical slags in mortar production. *In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 012023.

5. Obezvrezhivanie stochnyh vod v promyshlennosti betona (Velikobritaniya) [Waste water Treatment in the concrete industry (UK)] *Bulletin of foreign scientific and technical information on construction, architecture, building materials, structures and housing and communal services* 2015, 3: 14-15. (in Russian)

6. Kucherova, E.A., Panichev A.YU. Vvedenieosadkovstochnyhvodgal'vanicheskikhproizvodstv v massy stenovojkeramiki [Introduction of waste water sediments of electroplating industries into the mass of wall ceramics]. *Izvestiyavuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1992, 5:16-22. (in Russian)

7. Cybina A.V., D'yakov M.S., Vajsman YA.I. Sostoyanie i perspektivy obrabotki i utilizacii osadkov stochnyh vod [State and prospects of treatment and utilization of sewage sludge]. *Ecology and industry of Russia*, 2013, 12: 56–61. (in Russian)

8. Dregulo A.M. Issledovanie sostavov tyazhelyh metallov i fosfatov v polimernyh veshchestvah biomass syaktivnyhilov [Investigation of the compositions of heavy metals and phosphates in polymer substances of active sludge biomass]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniyaizd-vo: Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny arhitekturno-stroitel'nyjuniversitet*, 2020, 3 (83): 8-13. (in Russian)

9. Borzova YU.S., Ispol'zovanie ekologicheskibezopasnyhtekhnologijochistkistochnyhvod [Use of environmentally friendly wastewater treatment technologies]. *Young Science*, 2014, 1: 16-17. (in Russian)

10. Belyuchenko I.S., Osadkistochnyhvod, ihochistka i ispol'zovanie [Sewage sludge, its treatment and use]. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2016, 1: 82-95. (in Russian)

11. Valeev V.H., Somova YU.V., Somov V.A., Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya osadkov stochnyh vod ochistnyhsooruzhenij v kachestveudobreniya [Investigation of the possibility of using sewage sludge from wastewater treatment plants as fertilizer]. *Izvestiyavuzov. Prikladnayahimiya i biotekhnologiya*, 2015, 3(14): 69-73.

12. Prabhanjan N., Yadav G.S., Sahithi G., Sra-vanthi B. and Tipraj B. Assesment to Increase the Mechanical Properties of used Ballast by EDTA Solution as a Construction *In the collection: Material International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2020 : 157-160.

13. Doh S. I., Muhammad Aizat A., Chin S. C., Jing G. Q. Mechanical properties of concrete containing microwaved sewage sludge ash as partial cement replacement *In the collection: National Colloquium on Wind & Earthquake Engineering IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, C 012027 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/244/1/012027

14. Bahadori, H., & Hosseini, P. Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles

(Investigation on concrete properties). *Journal of Civil Engineering and Management*, 2012, 18: 416–425, doi:10.3846/13923730.2012.698912

15. Ribeiro, A. Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials. Fiúza, A.C.M. Castro, F.G. Silva, M.L. Dinis, J.P. Meixedo, M.R. *Composite Structures* 2013, 105: 300-310 doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.05.023

16. Vyboishchik A.V., Kostyunina I.L. Contemporary methods of production of pigments obtained from non-ferrous industrial waste. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 451 (2018) C. 012003, doi:10.1088/1757-899X/451/1/012003

17. Zaletova N.A., Voronov YU.V., Novyetechnologiyaresheniyasovremennyhzadachochistkistochnykhvod [New technologies for solving modern problems of wastewater treatment]. *Vestnik MGSU*, 2012, 2: 109-111.

18. Vasil'ev S.M., Domashenko YU.E., Lyashkov M.A., Opređenje zon razbavleniya pri povtornom ispol'zovanii stochnykh vod na orositel'nykh sistemah [Determination of dilution zones for wastewater reuse in irrigation systems]. *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii*, 2016, 2 (22): 17-29.

19. Yu S, Wang B, Pan Y, Chen Z, Meng F, Duan S, Cheng Z, Wu L, Wang M and Ma W 2018 Cleaner production of spherical nanostructure chromium oxide (Cr₂O₃) via a facile combination membrane and hydrothermal approach// *Journal of Cleaner Production*, 176, pp. 636-644, doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.108

20. Merkina I.V. Utilizacija tvjordyh othodov istochnykh vod v programme predotvrashheniya zagryazneniya okruzhajushhej sredy (Avstralija) [Disposal of solid waste and wastewater in the environmental pollution prevention program (Australia)]. *VNIINTPI. Stroitel'stvo i arhitektura. Ser. Inzhenernoe obespechenie ob'ektov stroitel'stva i ZHKKH: ekspres-inform*, 2007, 4: 77-78.

21. Sokolov P. E., Sentenberg S. A. Application of clusterization algorithms for building materials classification on radioactivity in R. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 687 (2019), C. 022003, doi:10.1088/1757-899X/687/2/022003 1

22. Krashenninnikova S.V. Vliyaniye urbanizirovannyh territorij na formirovaniye poveryhnostnogostoka [Influence of urbanized areas on the formation of surface runoff]. *Izvestiya PGPU im. V.G. Belinskogo*. 2008, 10(4):119-121.

23. Mestnikov A E, Fedorov V. I. Porous filler from foam-zeolite and light concretes based on it for conditions of the Arctic and the North. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 687 (2019), C. 022027, doi:10.1088/1757-899X/687/2/022027

24. SHonina N.A. Vodosnabzhenie i vodootvedenie v usloviyah Krajnego severa [Water supply and sanitation in the Far North]. *Santekhnika* [Plumbing], 5, 2012: 15-24.

25. Ambrosova, G. T., Kruglikova, A. V., Mansurov, R. SH., Rafal'skaya, T. A. i Timofeev, S. L. Vliyaniye prirodno-klimaticheskikh faktorov na effektivnost' raboty kryptykhochistnyh sooruzhenij kanalizacii [Influ-

ence of natural and climatic factors on the efficiency of open sewage treatment plants]. *Vodosnabzhenie i sanitarnayatehnika* [Water supply and sanitary equipment], 2019, 4: 48–59.

26. Gorbacheva, T.T., Majorov, D.V. Probnoe koagulirovaniye osvetlennykh kommunal'nykh stokov v reagentnomudaleniifosfora [Trial coagulation of clarified municipal wastewater in reagent phosphorus removal]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 2018, 12.1 (27): 504–508.

27. Randall, A.A., Chen, Y. and McCue, T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid. *Water Research*, 2014, 38(1): 27–36. doi: 10.1016/j.watres.2003.08.025.

28. Setegn, S. G. Water resources management for sustainable environmental public health. Setegn, S. G., Donoso, M. C. (eds.). *Sustainability of integrated water resources management: water governance, climate and ecohydrology*. Cham: Springer, 2015: 275–287. doi: 10.1007/978-3-319-121949 15.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Чулкова И.Л. Руководство процессом разработки темы.

Смирнова О.Е. Выбор направления и темы исследования. Разработка методологии исследования.

Красова А.В. Анализ состояния вопроса. Обработка результатов.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Irina L. Chulkova, guiding the process of developing the topic.

Olga E. Smirnova, selection of the direction and topic of the research. Development of the research methodology.

Anna V. Krasova, analysis of the status of the issue, processing of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация, технологии и материалы в строительстве»

Смирнова Ольга Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные материалы, стандартизация, сертификация»

Красова Анна Викторовна – аспирант кафедры «Строительные материалы, стандартизация, сертификация»

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina L. Chulkova (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Organisation, Technology and Materials in Construction Department

Olga E. Smirnova (Novosibirsk, Russia) – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Building Materials, Standardization, Certification Department

Anna V. Krasova (Novosibirsk, Russia) – Postgraduate the Building Materials, Standardization, Certification Department

Научная статья

УДК 625.7: 625.731

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ СДВИГУ В ГРУНТЕ

А.С. Александров

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>

АННОТАЦИЯ

Введение. Проверка грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды из слабосвязных¹ материалов по сопротивлению сдвигу является одним из трех обязательных условий расчета дорожных одежд по критериям прочности. Методика проверки грунтов земляного полотна и песчаных слоев дорожной одежды постоянно модифицируется, из-за чего в каждой новой версии нормативного документа появляются изменения, касающиеся определенных деталей расчета. Цель настоящей работы состоит в анализе, подчеркивающем достоинства классического решения А.М. Кривисского и раскрывающем суть ошибок, допущенных в последующих модификациях этого расчета.

Материалы и методы. Анализ решений выполнен с позиций соответствия основам механики. При этом показано, что расчет полного напряжения сдвига в классическом решении А.М. Кривисского выполняется в соответствии с принципом суперпозиции силы, состоящем в расчете компонент тензора напряжений от каждой силы (временной нагрузки и собственного веса материалов слоев) отдельно с последующим суммированием соответствующих составляющих. При этом активные напряжения сдвига от временной нагрузки и собственного веса материалов рассчитываются как эквивалентное напряжение критерия Мора – Кулона. Вычисление этих обеих составляющих полного напряжения сдвига выполняется при одном и том же значении угла внутреннего трения. Известно, что для критерия Мора – Кулона угол наклона площадки скольжения к главным осям определяется суммой или разностью 45 градусов и половины угла внутреннего трения. Значит, касательное и нормальное напряжения, являющиеся составляющими активного напряжения сдвига как от временной нагрузки, так и собственного веса материалов, определены для одной и той же площадки сдвига, повернутой к главным осям под одним и тем же углом. В действующих нормативных расчетах активные напряжения сдвига от временной нагрузки и собственного веса материалов определены при разных углах внутреннего трения. Значит, активные напряжения сдвига от временной нагрузки и собственного веса материалов действуют на двух разных площадках сдвига, повернутых к главным осям под разными углами. Такие напряжения нельзя суммировать или сравнивать друг с другом. Помимо этой ошибки нормативных методов расчета приведены другие их недостатки.

Результаты. В результате подробного анализа известных модификаций классического решения установлены очевидные противоречия принципам механики сплошной среды. В качестве альтернативы современным критериям расчета по сопротивлению сдвигу предложен трехпараметрический критерий пластичности грунта, в котором напряжение сдвига превышает эквивалентное напряжение в критерии Мора – Кулона. Показан принцип вывода из рассматриваемых критериев прочности формул для вычисления первой критической нагрузки и полного напряжения сдвига.

Заключение. Сделаны выводы о необходимости возврата к классическому решению, полученному специалистами Ленинградской школы СССР, или разработки принципиально нового решения, базирующегося на новом условии пластичности, в котором полное напряжение сдвига превышает аналогичную характеристику напряженного состояния – оригинального критерия Мора – Кулона.

¹ Использован термин, применяемый в нормативных документах и стандартах РФ, под которым понимается расчет по сопротивлению сдвигу в материале конструктивного слоя дорожной одежды. Согласно нормативным документам и стандартам РФ такой расчет обязательно выполняют для песков, применяемых в дополнительных слоях оснований. Поэтому здесь и далее под термином «слабосвязный материал» понимается, прежде всего, пески средние, крупные и гравелистые.

© Александров А.С., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: земляное полотно, сопротивление сдвигу, условие пластичности, сцепление, угол внутреннего трения

Статья поступила в редакцию 14.09.2021; одобрена после рецензирования 21.10.2021; принята к публикации 29.10.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Александров А.С. Анализ методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 576-613. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613>

ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATING ROAD STRUCTURES BASED BY SHEAR RESISTANCE IN THE SOIL

A.S. Aleksandrov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia
aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>

ABSTRACT

Introduction. Checking the soil of the subgrade and the layers of road pavement made of loosely cohesive materials by shear resistance is one of the three mandatory conditions for calculating road clothing according to strength criteria. The methodology for checking the soil of the subgrade and the sandy layers of the road pavement is constantly being modified, which is why changes concerning certain calculation details appear in each new version of the regulatory document. The purpose of this work is to analyze the advantages of the classical solution of A.M. Krivissky and to reveal the essence of the errors made in subsequent modifications of this calculation.

Materials and methods. The analysis of solutions is carried out from the standpoint of compliance with the basics of mechanics. It is shown that the calculation of the total shear stress in the classical solution of A.M. Krivissky is performed in accordance with the principle of force superposition, which consists in calculating the components of the stress tensor from each force (time load and the own weight of the layer materials) separately, followed by summing the corresponding components. In this case, the active shear stresses from the temporary load and the own weight of the materials are calculated as the equivalent stress of the Mohr-Coulomb criterion. The calculation of these two components of the total shear stress is performed at the same value of the internal friction angle. Since the angle of inclination of the sliding surface to the main axes is determined by the sum or difference of 45 degrees and half of the internal friction angle, the tangential and normal stresses, which are components of the active shear stress, both from the temporary load and the own weight of the materials, are determined for the same shear surface rotated to the main axes at the same angle. In the current normative calculations, the active shear stresses from the temporary load and the own weight of the materials are determined at different angles of internal friction. This means that the active shear stresses from the temporary load and the own weight of the materials act on two different shear surface rotated to the main axes at different angles. Such stresses cannot be summed up or compared with each other. In addition to this error of the normative calculation methods, their other disadvantages are given.

Results. As a result of a detailed analysis of the known modifications of the classical solution, obvious contradictions to the principles of continuum mechanics are established. As an alternative to modern calculation criteria for shear resistance, the article presents criteria for soil strength in which the shear stress exceeds the equivalent stress in the Mohr-Coulomb criterion. The principle of deducing formulas for calculating the first critical load and the total shear stress from the strength criteria under consideration is shown.

Conclusion. Conclusions are drawn about the need to return to the classical solution obtained by specialists of the Leningrad School of the USSR, or to develop a fundamentally new solution based on a new plasticity condition in which the total shear stress exceeds the similar characteristic of the stress state of the original Mohr - Coulomb criterion.

KEY WORDS: roadbed; shear resistance; plasticity condition; cohesion; angle of internal friction

© Aleksandrov A.S., 2021



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

The article was submitted 14.09.2021; approved after reviewing 21.10.2021; accepted for publication 29.10.2021.

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: Aleksandrov A.S. Analysis of methods of calculating road structures based by shear resistance in the soil The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (5): 576-613. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613>

ВВЕДЕНИЕ

Соппротивление грунтов земляного полотна и материалов дорожной одежды сдвигу обуславливает их сопротивление накапливаемым остаточным деформациям. Это проявляется в том, что чем меньше девиаторная составляющая напряжений, тем меньше величина необратимой составляющей упругопластической деформации. Наше утверждение можно продемонстрировать многочисленными математическими моделями, предназначенными для расчета накапливаемой остаточной деформации грунтами и зернистыми материалами [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], а также формулами для определения продольного, поперечного и объемного модуля деформации грунта и зернистого материала [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], применяемых для расчета упругопластических деформаций. Безусловно, что одним из способов ограничения накапливаемой остаточной деформации является обеспечение возникновения полных напряжений сдвига, величина которых не превышает некоторое предельное значение. Этот способ реализован в нормах и стандартах по расчету нежестких и жестких дорожных одежд, действовавших в разное время ВСН 46-72², ВСН 46-83³, ОДН 218.046-01⁴, ПНСТ 265-2018⁵, ВСН 197-83⁶, ВСН 197-91⁷ и ОДМ⁸. По мере развития нормативных документов критерий расчета дорожных одежд по сопротивлению сдвигу совершенствовался и видоизменялся различными научными коллективами. В результате выполненных модификаций критерий и расчет по сопротивлению сдвигу изменился от оригинального решения А.М. Кривисского

до современного варианта, представленного в ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021.

Анализ различных вариантов нормативного расчета грунтов земляного полотна и песчаных слоев дорожной одежды по сопротивлению сдвигу показывает, что модифицированные варианты обладают недостатками, не позволяющими считать их верными решениями. Одна из основных ошибок, допущенных в ОДН 218.046-01, обсуждалась нами в работе [21]. Суть этой ошибки состоит в том, что полное напряжение сдвига от временной нагрузки и его предельное значение вычисляются при разных значениях угла внутреннего трения. Согласно основам механики грунтов угол наклона площадки скольжения к главным осям в условии пластичности Мора – Кулона определяется суммой или разностью 45 градусов и половины угла внутреннего трения. Поэтому в действующих нормативных методах расчета полное напряжение сдвига от временной нагрузки и его предельная величина вычисляются для двух разных площадок. Эта ошибка требует устранения. Однако новый модифицированный вариант решения, регламентируемый ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021, содержит эту же ошибку, к которой в результате новых модификаций прибавились другие, рассматриваемые в данной работе.

Цель статьи состоит в анализе оригинального метода расчета по сопротивлению сдвигу, созданного А.М. Кривисским, ставшего основой для нормативных расчетов по ВСН 46-72 и ВСН 46-83 и всех его последующих модификаций. В следующем подразделе с позиции основ механики грунтов мы постараемся доступно показать безукоризненность оригинального

² Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-72. М. : Транспорт, 1973 110 с.

³ Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. М. : Транспорт, 1985. 157 с.

⁴ Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218-046-01. М. : ГСДХ Минтранса России, 2001. 146 с.

⁵ ПНСТ 265-2018. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: Стандартинформ, 2018. 73 с.

⁶ Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-83. М. : Минтрансстрой, 1984. 129 с.

⁷ Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-91. М. : Союздорнии, 1992. 130 с.

⁸ ОДМ. Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд. М. : Росавтодор. 2004.

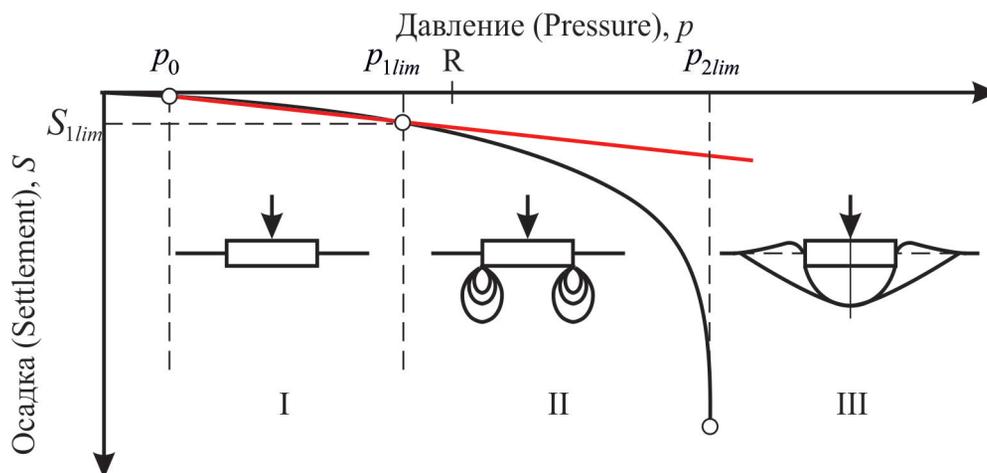


Рисунок 1 – Современные представления о фазах деформирования грунтового основания

Figure 1 – Modern ideas about the phases of deformation of the soil base

решения А.М. Кривисского и ошибочность его современных модификаций. В ходе данного анализа разъясним ошибочность суждений специалистов дорожной отрасли, разработавших современные стандарты.

В настоящее время для вывода формул, позволяющих рассчитывать грунтовые основания по сопротивлению сдвигу, применяется три метода: линейно деформируемой среды, поверхностей скольжения и теории предельного равновесия грунта. Суть этих методов и их отличия можно пояснить, рассматривая фазы деформирования грунтового основания. Основы этого учения созданы Н.М. Герсевановым⁹, развиты в работах В.Г. Березанцева¹⁰, а в современном, наиболее полном виде, включающем все четыре критические нагрузки (структурная прочность, первая и вторая критические нагрузки, расчетное сопротивление грунта), приводятся в учебных пособиях¹¹. Следовательно, учение о фазах деформирования грунтового основания является базовым знанием инженеров, которое должно неукоснительно соблюдаться в любом методе расчета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1 представлена графическая зависимость осадки основания от давления. На оси абсцисс приведены 4 критические нагрузки, отделяющие фазы деформирования.

Согласно работе Н.М. Герсеванова критические нагрузки можно определить экспериментально. В своей работе Н.М. Герсеванов привел результаты испытаний песчаного основания, на основе которых были предложены две критические нагрузки: первая p_{1lim} и вторая p_{2lim} . Эти две критические нагрузки разделяют три фазы деформирования основания. Первой фазой называют фазу уплотнения, при возникновении которой осадка грунта с давлением связана линейной зависимостью. В этой фазе перемещение частиц грунта преимущественно происходит в вертикальном направлении. Диапазон давлений, при которых имеет место такое деформирование, ограничен первой критической нагрузкой p_{1lim} . При передаче на грунтовое основание давления, равного первой критической нагрузке, в наиболее опасной точке полупространства возникает площадка скольжения, на которой достигнуто предельное состояние по критерию Мора – Кулона. Во всех остальных точках при таком давлении предельное состояние по условию пластичности Мора – Кулона еще не достигнуто. В фазе уплотнения осадка основания является упругопластической, состоящей из обратимой и необратимой составляющих. Так как осадка связана с давлением линейно, то для ее определения используют решения теории упругости, заменяя продольный модуль

⁹ Герсеванов Н.М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ. Труды МИИТ, 1930. Вып. XV. С. 255 – 284.

¹⁰ Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений / В.Г. Березанцев. Л.: Изд-во литературы по строительству, 1970. 207 с.

¹¹ Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.

упругости продольным модулем деформации грунта. Отсюда следует ошибочность трактовки критерия расчета элементов дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу некоторыми специалистами, утверждающими, что при выполнении критерия нормативного расчета грунты земляного полотна испытывают упругие деформации, не деформируясь пластично. Основы учения Н.М. Герсеванова нам явно говорят, что в этом диапазоне давлений осадка является упругопластической и обратима лишь от части.

Вторая фаза деформирования называется фазой сдвигов. В этой фазе деформирования под краями штампа образуются области с предельным состоянием грунта по оригинальному критерию пластичности Мора – Кулона. С увеличением давления на грунтовое основание размеры возникающих неустойчивых областей возрастают. Осадка является упругопластической и нелинейно зависит от давления. При достижении давлением некоторой предельной величины, называемой второй критической нагрузкой, неустойчивые области смыкаются, а поверхность скольжения выходит на поверхность грунтового основания. Этот процесс сопровождается выпором грунта за пределами штампа. По результатам испытаний песчаных грунтовых оснований Н.М. Герсеванов внес предложение принять вторую критическую нагрузку p_{2lim} в качестве предельного давления на грунт.

Третья фаза деформирования называется фазой выпора грунта, в которой грунт по поверхности скольжения смещается за пределы площадки, передающей нагрузку. В этой стадии несущая способность основания полностью исчерпана, механизм распределения нагрузки нарушен.

В дальнейшем В.Г. Боезанцев установил, что начало образования выпора грунта за пределами нагруженной площадки можно безошибочно установить только при испытаниях песчаных грунтов и в условиях проведения штамповых испытаний на поверхности. В.Г. Березанцев указывает, что при испытаниях связанных грунтов зоны выпора трудно различимы, такая же сложность возникает при испытаниях любых грунтов фундаментом глубокого заложения. Поэтому в учение Н.М. Герсеванова внесли коррективы, согласно которым под предельным давлением на грунтовый массив стали понимать расчетное сопротивление грунта основания R . Под этой характеристикой подразумевают величину давления, при которой в стадии сдвигов глубина областей распространения пластических деформаций со-

ставляет 25% от ширины фундамента. В силу этого определения имеет место неравенство $p_{1lim} < R < p_{2lim}$. Обратим внимание, что неравенство именно такое. Это объясняется тем, что первая критическая нагрузка соответствует величине давления, при которой в наиболее опасной точке грунтового основания возникает предельное состояние по оригинальному условию пластичности Мора – Кулона. В данном случае зоны распространения пластических деформаций только начинают зарождаться в наиболее опасных точках, например, при воздействии равномерно распределенной нагрузки по полосе, зарождение пластических областей происходит в точках под краями полосы. Вторая критическая нагрузка равна давлению, при возникновении которого зоны распространения пластических деформаций распространились на всю глубину и сомкнулись. При расчете осадок фундаментов, грунтовое основание которых работает во второй фазе деформирования, предполагают, что сопротивление грунта основания R является величиной давления, отделяющей стадию линейного упругопластического деформирования от нелинейного деформирования.

Структурная прочность грунтового основания p_0 ограничивает диапазон давлений, при которых грунт проявляет свойства упругого тела, претерпевая только обратимые осадки, не испытывая пластических деформаций. Структурная прочность по величине является наименьшей из всех критических нагрузок. Величина структурной прочности составляет 5–10% от несущей способности грунтового основания. Обратим внимание, что именно структурная прочность, а не первая критическая нагрузка ограничивает диапазон давлений, при возникновении которых грунтовое основание испытывает исключительно обратимые осадки. При давлениях, варьирующихся в диапазоне, ограниченном снизу структурной прочностью, а сверху первой критической нагрузкой, осадка грунта упругопластическая, часть которой необратима.

При решении задачи о предельном сопротивлении грунтов сдвигу при работе основания в первой или второй фазе деформирования применяют разные методы, основанные на различном математическом аппарате. Для вывода формул методом линейно-деформируемой среды в основу расчета безопасного давления или полного напряжения сдвига в наиболее опасной точке закладывают условие пластичности, как правило, записанное в главных напряжениях. В это условие пластичности подставляют выражения для расчета главных

напряжений, которые для любой нагрузки прямо пропорциональны давлению на основание. Вывод формулы для расчета безопасного давления выполняют из условия возникновения предельного состояния по принятому условию пластичности в точке грунтовой среды. Конечную формулу получают прямым решением алгебраического уравнения, описывающего предельное состояние по принятому условию пластичности, относительно величины давления. Если предельное состояние по принятому условию пластичности записано для наиболее опасной точки грунтового основания, то полученная формула безопасного давления представляет собой выражение для определения первой критической нагрузки. Такое решение для нагрузки, распределенной по гибкой полосе (ленточный фундамент), получено Н.П. Пузыревским. Специалисты предпринимали попытки применения этого метода для расчета безопасного давления при условии допущения возникновения в грунте неустойчивой области. В такой неустойчивой области грунт имеет предельное состояние по условию пластичности Мора–Кулона. В данных решениях принимались различные значения глубин распространения неустойчивых областей. Поэтому предельные давления, полученные при условии возникновения неустойчивой области, имеют более высокое значение по сравнению с первой критической нагрузкой. Главным недостатком этих решений является факт наличия неустойчивой области, которая обуславливает нелинейную зависимость осадки от давления. Это противоречит допущению

о линейной зависимости осадки от давления применяемому при выводе формул расчета предельного давления в методе линейно деформируемой среды. Тем не менее решение Н.П. Пузыревского о первой критической нагрузке данного недостатка не имеет и применяется для расчета безопасного давления на грунтовое основание, воспринимающее нагрузку от ленточного фундамента. Принципам этого решения в полной мере соответствует решение А.М. Кривисского, которое дано для полных напряжений сдвига в наиболее опасной точке нижнего слоя двухслойной системы. Разница решений Н.П. Пузыревского и А.М. Кривисского заключается в том, что в первом случае вычисляют безопасное давление в виде первой критической нагрузки, а во втором случае рассчитывают полные напряжения сдвига, которые принимают критическое значение тогда, когда давление на основание становится равным первой критической нагрузке.

Из нашего вывода следует, что решения о безопасных давлениях и напряжениях сдвига, полученные методом линейно деформируемой среды, важны для специалистов дорожной отрасли. Поэтому приведем подробные решения некоторых задач, полученные с применением данного метода, и покажем границы применения этого способа.

В основе решений метода линейно деформируемой среды заложено условие пластичности Мора – Кулона. Этот критерий имеет различные формы записи, представленные в таблице 1, но результат всегда одинаков и не зависит от принятой формы записи.

Таблица 1
Уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона

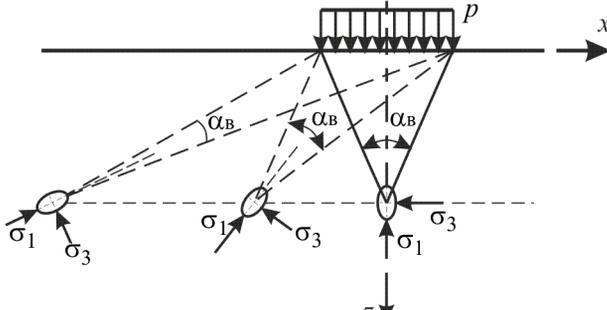
Table 1
Limit state equations of the Mohr–Coulomb criterion

Авторы, применявшие уравнение	Математическое выражение уравнения предельного состояния
В.В. Соколовский ¹²	$\frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg}\varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = c,$ где φ – угол внутреннего трения, град; c – сцепление, Па
Т. Бенз [22]	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}\varphi + \sigma_1 + \sigma_3} = \sin\varphi$
Р.Ф. Црайг [23]	$\sigma_1 \cdot (1 - \sin\varphi) - \sigma_3 \cdot (1 + \sin\varphi) = 2 \cdot c \cdot \cos\varphi$

¹² Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1960. 242 с.

Таблица 2
Решение Джона Генри Мичелла

Table 2
John Henry Michell's Solution

Расчетная схема	Формулы
 <p>The diagram shows a horizontal flexible strip of width \$2a\$ under a uniformly distributed load \$P\$. A coordinate system \$(x, z)\$ is centered on the strip, with \$x\$ horizontal and \$z\$ vertical downwards. At a depth \$z\$ below the strip, three Mohr's circles are shown, representing the principal stresses \$\sigma_1\$ and \$\sigma_3\$. The angle \$\alpha_B\$ is defined as the angle between the vertical \$z\$-axis and the line connecting the center of the strip to the center of the Mohr's circle at depth \$z\$.</p>	$\sigma_1 = \frac{P}{\pi} \cdot (\alpha_B + \sin \alpha_B);$ $\sigma_3 = \frac{P}{\pi} \cdot (\alpha_B - \sin \alpha_B),$ <p>где \$p\$ – давление, распределенное по гибкой полосе и передаваемое на основание, Па; α_B – угол, видимости нагрузки, показанный на расчетной схеме, радиан.</p>

Н.П. Пузыревский дал общее решение о величине безопасного давления на грунтовое основание от нагрузки, распределенной по гибкой полосе. Поэтому для расчета главных напряжений Н.П. Пузыревский воспользовался решением Мичелла. Это решение и расчетная схема приведены в таблице 2.

Применяя формулы решения Дж. Мичелла, Н.П. Пузыревский учел в них напряжения от веса боковой пригрузки. В результате формулы для расчета главных напряжений приобрели вид

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{p - \gamma \cdot h}{\pi} \cdot (\alpha_B \pm \sin \alpha_B) + \gamma \cdot (z + h), \quad (1)$$

где \$\gamma\$ – вес грунта, Н/м³; \$h\$ – высота боковой пригрузки, м; \$z\$ – расстояние от подошвы фундамента до наиболее опасной точки грунтового основания, в которой возникает предельное состояние, м.

Анализируя формулы (1), отметим, что их второе слагаемое определяет главные напряжения от веса боковой пригрузки, оно одинаковое. Следовательно, в решении Н.П. Пузыревского максимальное и минимальное напряжения от веса грунта равны, то есть принят закон гидростатики – гипотеза А. Гейма. В общем случае минимальное главное напряжение от веса грунта определяется произведением коэффициента бокового давления \$\xi\$ и максимального главного напряжения. В условиях гидростатического сжатия \$\xi=1\$.

Эта особенность накладывает ограничения на область применения решения Н.П. Пузыревского. Ограничение связано с тем, что равенство \$\xi=1\$ имеет место только тогда, когда коэффициент Пуассона \$\mu\$ равен предельному значению, то есть \$\mu=0,5\$ (закон упругости – гипотеза А. Динника). Результаты лабораторных испытаний дают основание утверждать, что большинство разновидностей грунтов характеризуются коэффициентом Пуассона \$\mu < 0,5\$ и коэффициентом бокового давления \$\xi < 1\$. Специалисты в области механики грунтов, например авторы публикации [24], тоже отмечают дискуссионность вопроса \$\mu=0,5\$, отмечая, что мнения по этому поводу расходятся. Ориентируясь на рисунок 8 руководства¹³, отметим, что при трехосных испытаниях глинистых грунтов в камере типа Б фиксируются значения \$\xi < 1\$, значит, \$\mu < 0,5\$. Тем не менее известно, что материалы, находящиеся в текучем состоянии, имеют \$\mu=0,5\$ и \$\xi=1\$. Текучее состояние грунтов обуславливается либо высокой влажностью и/или пористостью, либо вызвано длительной и высокой нагрузкой. Поэтому разновидности грунтов, напряженное состояние которых описывается формулами (1), существенно ограничены. В решении А.М. Кривисского \$\xi \le 1\$, вследствие чего оно применимо к расчету напряжений сдвига в любом дисперсном грунте.

В решении Н.П. Пузыревского формулы (1) подставляются в уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона, которое решается относительно величины \$z\$:

¹³ Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистого грунта. М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1978.

$$z = \frac{p - \gamma \cdot h}{\pi \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{\sin \alpha_B}{\sin \varphi} - \alpha_B \right) - h - \frac{c}{\gamma} \cdot \text{ctg} \varphi. \quad (2)$$

Из анализа уравнения (2) приходят к выводу, что максимальное значение величины z имеет место при определении угла α_B по формуле:

$$\alpha_B = \frac{\pi}{2} - \varphi. \quad (3)$$

Подставляя зависимость (3) в уравнение (2), получают формулу для определения z_{\max} [25]:

$$z_{\max} = \frac{p - \gamma \cdot h}{\pi \cdot \gamma} \cdot \left(\text{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right) - h - \frac{c}{\gamma} \cdot \text{ctg} \varphi. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно давления, получают формулу, которая имеет вид:

$$p = \left(z_{\max} + h + \frac{c}{\gamma} \cdot \text{ctg} \varphi \right) \cdot \frac{\pi \cdot \gamma}{\text{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h. \quad (5)$$

Формула (5) является общим решением задачи о безопасном давлении от гибкого ленточного фундамента. При подстановке в эту зависимость различных значений глубины z_{\max} из нее вытекают все частные решения. Схемы развития неустойчивых областей даны на рисунке 2.

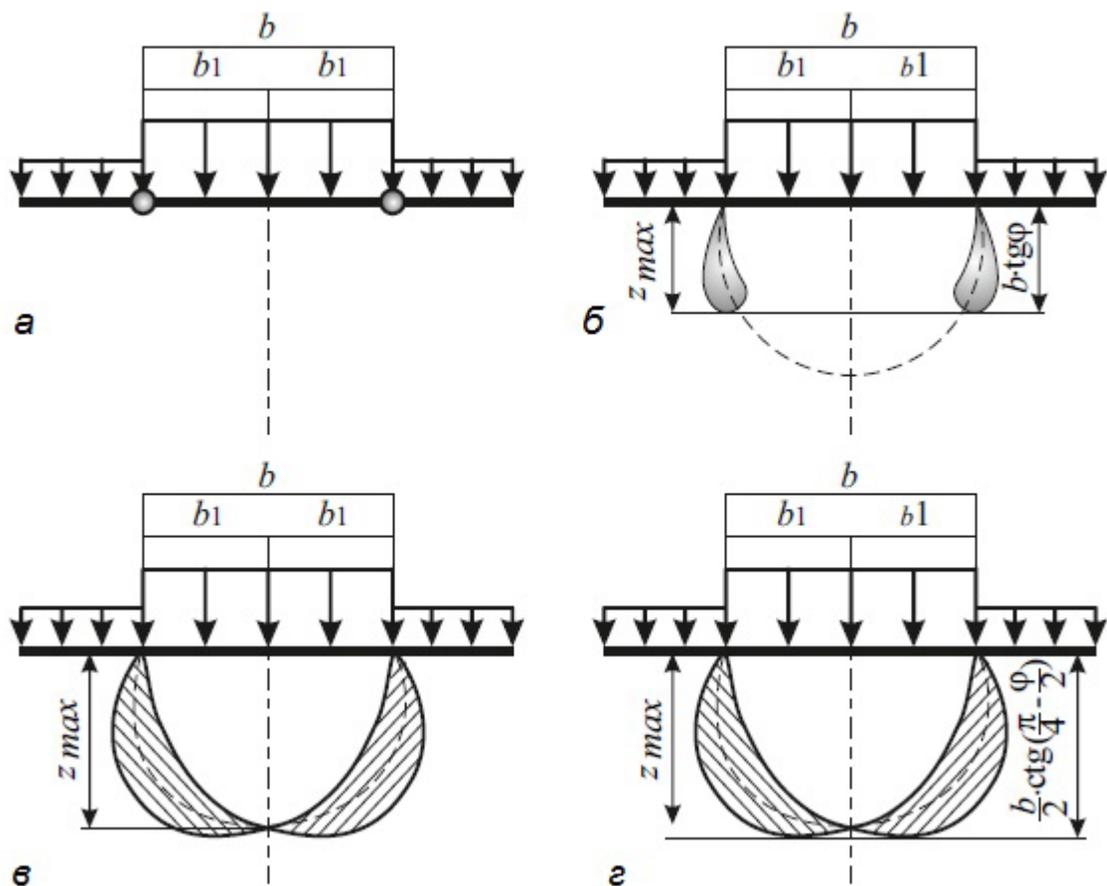


Рисунок 2 – Расчетные схемы развития неустойчивых областей:
 а – решение Н.П. Пузыревского, $z_{\max}=0$; б – решение Н.Н. Маслова, $z_{\max}=b \cdot \text{tg} \varphi$;
 в – решение С.П. Шеляпина, z_{\max} определяется расстоянием от поверхности основания до точки касания неустойчивых областей грунта; г – решение И.В. Яропольского, $z_{\max}=0,5 \cdot b \cdot \text{ctg}(0,25 \cdot \pi - 0,5 \cdot \varphi)$

Figure 2 – Calculation schemes for the development of unstable areas:
 а – solution N.P. Puzyrevskiy, $z_{\max}=0$; б – solution N.N. Maslova, $z_{\max}=b \cdot \text{tg} \varphi$;
 в – solution S.P. Shelyapina, z_{\max} is determined by the distance from the surface to the tangent point of unstable areas of the ground;
 г – solution I.V. Yaropolskoe, $z_{\max}=0,5 \cdot b \cdot \text{ctg}(0,25 \cdot \pi - 0,5 \cdot \varphi)$

Согласно идеи Н.П. Пузыревского безопасное давление можно определить, подставив в формулу (5) нулевое значение глубины распространения неустойчивой области. Подставив в выражение (5) $z_{max}=0$ и выполнив преобразования, получим формулу Н.П. Пузыревского:

$$p_{без} = \gamma \cdot h \cdot \frac{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi + \frac{\pi}{2}}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \frac{\pi \cdot c \cdot \operatorname{ctg}\varphi}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}. \quad (6)$$

Н.Н. Маслов предположил, что потеря устойчивости фундамента наступает тогда, когда глубина распространения неустойчивых областей определяется по формуле¹⁴:

$$z_{max} = b \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в зависимость (5) и решив последнюю относительно давления, получим формулу Н.Н. Маслова, которая имеет вид

$$p_{без} = \frac{\gamma \cdot \pi \cdot \left(2 \cdot b_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi + h + \frac{c}{\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi} \right)}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h, \quad (8)$$

где b_1 – полуширина фундамента, м.

В решениях С.П. Шеляпина и И.В. Яропольского принимается допущение, что неустойчивые области могут распространяться по всей глубине, смыкаясь в точке, расположенной по оси симметрии нагрузки. Обе формулы приведены в работе О.Г. Денисова¹⁵

По И.В. Яропольскому безопасное давление определяется по формуле:

$$p_{без} = \frac{\gamma \cdot \pi \cdot \left[h + b_1 \cdot \operatorname{ctg}\left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{c}{\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi} \right]}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h. \quad (9)$$

По С.П. Шеляпину безопасное давление находят по формуле:

$$p_{без} = \frac{\gamma \cdot \pi \cdot \left(h + b_1 \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha_B}{4} + \frac{c}{\gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi} \right)}{\frac{\sin(\alpha_B/2)}{\sin\varphi} - \frac{\alpha_B}{2}} + \gamma \cdot h. \quad (10)$$

Из анализа формул для расчета безопасных давлений (6), (8), (9), (10) следует, что каждая из них предназначена для определения одной из критических нагрузок, указанных на рисунке 1. Так, формула Н.П. Пузыревского определяет первую критическую нагрузку. Физический смысл этой формулы состоит в том, что при давлении, равном безопасной величине, вычисляемой по формуле (6), в наиболее опасных точках, расположенных под краями фундамента, возникает предельное состояние по критерию Мора – Кулона, положенного в основу вывода этой формулы. В зависимостях С.П. Шеляпина и И.В. Яропольского предполагается, что формирование неустойчивых областей в массиве грунта завершено, а эти области сомкнулись. Следовательно, формулы (9) и (10) предназначены для определения второй критической нагрузки. В зависимости Н.Н. Маслова глубина неустойчивых областей больше нуля, но меньше их полного распространения. Поэтому зависимость (9) определяет некоторую промежуточную несущую способность грунта, величина которой меньше второй критической нагрузки, но больше расчетного сопротивления грунта R , которое определяют при условии распространения неустойчивых областей на глубину, составляющую 25% от ширины фундамента.

Анализируя формулы для определения безопасных давлений, полученные методом линейно деформируемой среды, специалисты указывают, что идея о распространении неустойчивых областей противоречит принципу линейного деформирования. Этот вывод вытекает из анализа зависимости осадки от давления, показанной на рисунке 1. Согласно рисунку линейная зависимость осадки от давления имеет место тогда, когда давление не превышает первую критическую нагрузку. Следовательно, метод линейно деформируемой среды применим при решении задач о первой критической нагрузке, ограничивающей фазу уплотнения грунта.

Обсуждая классические решения (6), (8), (9) и (10), отметим, что известны работы, в которых линейная зависимость осадки от давления ограничивается расчетным сопротивлением грунта, а не первой критической нагрузкой. Эта идея используется в нормативах по проектированию фундаментов. Приняв такое до-

¹⁴ Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М. : Высшая школа, 1968. 629 с.

¹⁵ Денисов О.Г. Основания и фундаменты промышленных зданий и сооружений (с элементами механики грунтов). М. : Высшая школа, 1968. 375 с.

пущение, область применения метода линейно деформируемой среды можно расширить, используя этот метод в качестве приближения при выводе формул для вычисления расчетного сопротивления грунта.

Для более высоких критических нагрузок метод линейно-деформируемой среды и решение в напряжениях сдвига А.М. Кривисского не применимы, что объясняется нелинейной зависимостью осадки от таких больших давлений. В таких случаях применяют либо метод поверхностей скольжения^{16, 17, 18}, либо теорию предельного равновесия грунта [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]. Решение теории предельного равновесия грунта используется при проектировании дорожных одежд жесткого типа. За рубежом этот метод нашел более широкое применение, его используют для определения допустимого давления на грунт от колеса [34, 35]. Для применения этой теории к определению допустимой нагрузки на грунт от колеса авторы работ [34, 35] применяют концепцию абсолютно жесткого колеса. Эта концепция сформулирована в работе [36]. Абсолютно жесткое колесо, в отличие от пневматической шины, не деформируется, то есть свойства жесткого колеса по отношению к грунту подобны свойствам фундамента. Такую концепцию можно принять для катков с металлическими вальцами, но для дорожной конструкции эта концепция вряд ли применима.

Первый расчет дорожной одежды по сдвигу в грунте земляного полотна, созданный А.М. Кривисским, основан на идее вычисления полного напряжения сдвига, возникающего в наиболее опасной точке. Наиболее опасная точка принадлежит оси симметрии нагрузки и расположена на поверхности нижнего слоя двухслойной системы. Эта идея позволила применить к расчету полного напряжения сдвига метод линейно деформируемой среды. Ниже представим подробный анализ решения А.М. Кривисского.

В основе расчета А.М. Кривисского лежит критерий пластичности Мора – Кулона в трактовке В.В. Соколовского. Суть данной трактовки состоит в том, что грунт, как правило, обладает двумя параметрами: сцеплением и углом внутреннего трения. Но иногда встречаются грунты, обладающие только одним из этих двух параметров. Поэтому в классификации В.В. Соколовского двухпараметрический критерий Мора – Кулона применяется к реальному грунту, обладающему сцеплением и углом внутреннего трения, а однопараметрические критерии применимы к идеально сыпучей ($c=0$) или идеально связной ($\phi=0$) средам. Уравнения предельного состояния по всем трем критериям приведены в таблице 3.

Таблица 3
Уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона по В.В. Соколовскому

Table 3
Equations of the limit state of the Mohr-Coulomb criterion according to V. V. Sokolovsky

Вид среды по В.В. Соколовскому	Уравнение предельного состояния	
	в главных напряжениях	в компонентах напряжения
Идеально сыпучая $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$.	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi$	$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}{(\sigma_z + \sigma_x)^2} = \sin^2 \varphi$
Идеально связная $\tau = c$.	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot c$	$(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2 = 4 \cdot c^2$
Обладающая сцеплением и внутренним трением $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$.	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = c$	$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}{(\sigma_z + \sigma_x + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2} = \sin^2 \varphi$

¹⁶ Феллениус В. Статика грунтов. В кн.: Геотехнические исследования грунтов. : пер. с нем. П.С. Рубан. М.; Л. : НКТП-СССР-Гостройиздат, 1933. С. 45–93.

¹⁷ Леденев В.В. и др. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 313 с.

¹⁸ Основания и фундаменты / А.Б. Пономарев, А.В. Захаров, Д.Г. Золотозубов, С.В. Калошина : учеб.-метод. пособие – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 318 с.

Уравнения предельного состояния, представленные в таблице 3, записаны как в главных, так и в произвольно ориентированных осях. Для перехода от главных осей к декартовой системе координат применяют известные формулы, имеющие вид:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}; \quad (11)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}; \quad (12)$$

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_z + \sigma_x. \quad (13)$$

Решение А.М. Кривисского выполнено в главных осях, а критерий прочности дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна имеет вид¹⁹:

$$T_a \leq \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot c}{n \cdot m}, \quad (14)$$

где T_a – полное активное напряжение сдвига, МПа; n – коэффициент перегрузки; m – коэффициент, учитывающий отклонение условий взаимодействия слоев на контакте от принятой расчетной схемы при вычислении касательного напряжения от транспортной нагрузки; k_1 – коэффициент, учитывающий снижение величины нормативного сопротивления сдвигу в результате воздействия повторных нагрузок от движения $k_1=0,66$; k_2 – коэффициент запаса на возможные отклонения от расчетных условий.

Полное активное напряжение сдвига определяется суммой напряжений сдвига от временной (транспортной) нагрузки $\tau_{ан}$ и собственного веса вышележащих слоев $\tau_{ав}$ и записывается в виде:

$$T_a = \tau_{ан} + \tau_{ав}. \quad (15)$$

$$\tau_{ан} = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg}\varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (16)$$

$$\tau_{ав} = \frac{\gamma_{ср}}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot [1 - \xi - (1 + \xi) \cdot \sin\varphi] \cdot h, \quad (17)$$

где h – суммарная толщина слоев дорожной

одежды, расположенных над проверяемым полупространством или слоем, м; $\gamma_{ср}$ – усредненный объемный вес материалов слоев дорожной одежды, расположенных выше проверяемого слоя или полупространства, МН/м³; ξ – коэффициент бокового давления в материале подстилающего слоя.

Анализируя зависимость (17), отметим, что эта формула получена из левой части уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона, аналогичной формуле (16), но с той разницей, что максимальное и минимальное главные напряжения определены от собственного веса вышележащих слоев. Для демонстрации нашего утверждения активное напряжение сдвига $\tau_{ав}$ представим формулой

$$\tau_{ав} = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\sigma_{1\gamma} - \sigma_{3\gamma}}{2} - \frac{\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma}}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (18)$$

где $\sigma_{1\gamma}$ и $\sigma_{3\gamma}$ – максимальное и минимальное главные напряжения от веса грунта, МПа.

Рассматривая уравнение (18) отметим, что максимальное главное напряжение нужно определить произведением веса дорожной одежды, усредненного по ее толщине $\gamma_{ср}$, и толщины дорожной одежды h . Минимальное главное напряжение определяется в соответствии с общепринятым физическим законом, согласно которому грунт работает в условиях компрессионного сжатия. То есть, минимальное главное напряжение от собственного веса вышележащих слоев определяется произведением коэффициента бокового давления ξ и максимального главного напряжения от веса слоев, расположенных над рассчитываемой точкой. Таким образом, главные напряжения $\sigma_{1\gamma}$ и $\sigma_{3\gamma}$ на границе раздела дорожной одежды и земляного полотна однозначно находятся по формулам:

$$\sigma_{1\gamma} = \gamma_{ср} \cdot h; \quad \sigma_{3\gamma} = \xi \cdot \gamma_{ср} \cdot h, \quad (19)$$

где $\gamma_{ср}$ – вес дорожной одежды, вычисляемый как величина усредненная по толщине дорожной одежды, МН/м³; h – суммарная толщина дорожной одежды, м.

Подставим формулы (19) в уравнение (18), тогда получим

$$\tau_{ав} = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\gamma_{ср} \cdot h - \xi \cdot \gamma_{ср} \cdot h}{2} - \frac{\gamma_{ср} \cdot h + \xi \cdot \gamma_{ср} \cdot h}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi. \quad (20)$$

¹⁹ Кривисский А.М. Принципы назначения конструкций дорожных одежд нежесткого типа на магистральных автомобильных дорогах : автореф. ... д-ра техн. наук. Л. : ЛИСИ, 1963. 31 с.

Для упрощения уравнения (20) перепишем его в виде

$$\tau_{ав} = \frac{\gamma_{ср}}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot (h - \xi \cdot h) - \frac{\gamma_{ср}}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot (h + \xi \cdot h) \cdot \sin\varphi. \quad (21)$$

Упрощая выражение (21), общие множители $\gamma_{ср}/(2 \cdot \cos\varphi)$ и h вынесем за скобки, поставив первый общий множитель $\gamma_{ср}/(2 \cdot \cos\varphi)$ перед скобкой, а второй общий множитель h за скобкой. Тогда получим:

$$\tau_{ав} = \frac{\gamma_{ср}}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot [1 - \xi - (1 + \xi) \cdot \sin\varphi] \cdot h. \quad (22)$$

Сопоставив формулы (17) и (22) несложно убедиться в их идентичности. Наш анализ показывает, что формула (17) получена из формулы (18). Поэтому в основе формул (16) и (17) лежит один и тот же критерий Мора – Кулона. В формулах (16) и (17) угол внутреннего трения имеет одно и то же значение. Отсюда следует, что в оригинальном решении А.М. Кривисского напряжения сдвига от временной нагрузки и собственного веса дорожной одежды определяются как в одной и той же точке, так и для одной и той же площадки, проведен-

ной через эту точку. Рассматривая номограмму в ВСН 46-83, предназначенную для вычисления напряжения сдвига от веса дорожной одежды, отметим, что этот график можно построить, используя формулу (17) или идентичную ей зависимость (22), но задавшись определенными значениями параметров $\gamma_{ср}$ и ξ . Сделанный вывод подтвердим конкретными расчетами, но учитывая то, что у словиях компрессионного сжатия коэффициент бокового давления ξ является функцией коэффициента Пуассона μ и вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (23)$$

Выполняя расчеты, определим относительную величину напряжения сдвига от собственного веса $\tau_{ав}/\gamma_{ср}$ при коэффициенте Пуассона 0,27 (крупнообломочные грунты), 0,3 (пески и супеси), 0,35 (суглинки) и 0,42 (глины). При этом значения углов внутреннего трения прием такими же, как в ВСН 46-83, то есть $\varphi=5^\circ$; 10° ; 13° ; 20° ; 30° и 40° , добавив к ним $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=45^\circ$.

Результаты этих расчетов представлены на рисунке 3.

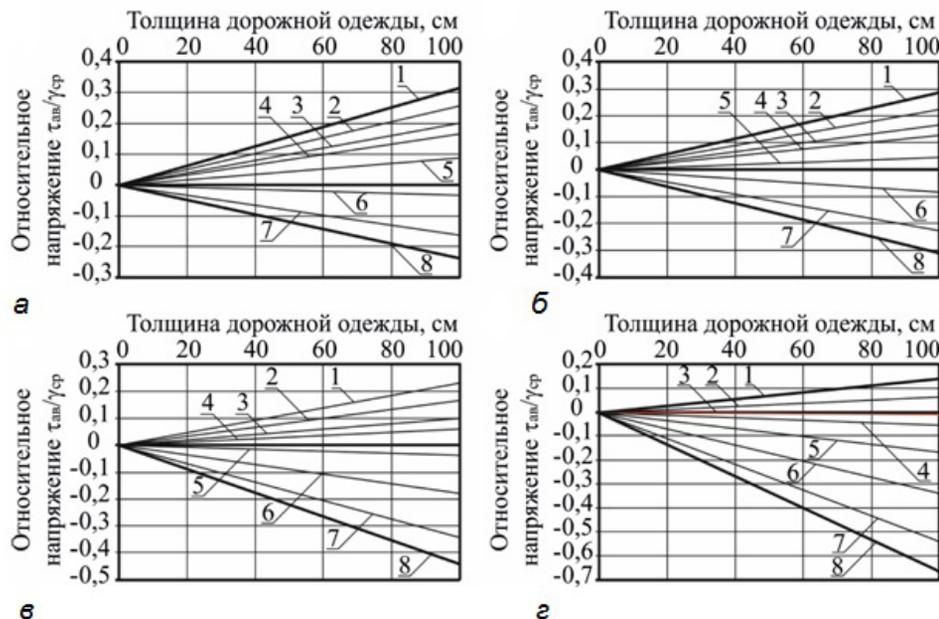


Рисунок 3 – Зависимость относительного напряжения сдвига, возникающего в результате действия веса дорожной одежды, от ее суммарной толщины: а – для коэффициента Пуассона $\mu=0,27$; б – для коэффициента Пуассона $\mu=0,30$; в – для коэффициента Пуассона $\mu=0,35$; г – для коэффициента Пуассона $\mu=0,42$; 1–8 при угле внутреннего трения 0, 5, 10, 13, 20, 30, 40 и 45 град.

Figure 3 – Dependence of the relative shear stress that occurs as a result of the weight of the pavement, its total thickness: and for Poisson's ratio $\mu=0,27$; б – for Poisson's ratio $\mu=0,30$; and for Poisson's ratio $\mu=0,35$; г – for Poisson's ratio $\mu=0,42$; 1 – 8 at an angle of internal friction 0, 5, 10, 13, 20, 30, 40 and 45 degrees

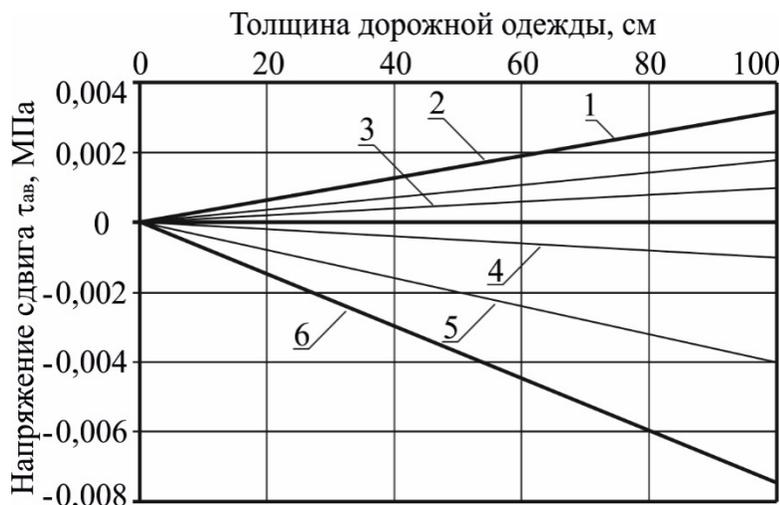


Рисунок 4 – Зависимость напряжения сдвига от толщины дорожной одежды при $\mu=0,358$ и $\gamma_{cp}=0,021$ МН/м³: 1–6 при угле внутреннего трения 5, 10, 13, 20, 30 и 40 град.

Figure 4 – The dependence of the shear stress on the thickness of the pavement at $\mu=0.358$ and $\gamma_{cp}=0.021$ MN / m³: 1-6 at an angle of internal friction of 5, 10, 13, 20, 30 and 40 degrees.

Графические зависимости напряжения сдвига от веса дорожной одежды, представленные на рисунке 3, являются общим случаем и охватывают практически весь диапазон возможных решений для различных грунтов. Номограмма ВСН 46-83 построена при определенных значениях входных параметров и является частным случаем. Отличительной чертой этой графической зависимости является симметричность нулевых значений напряжений сдвига ($\tau_{ав}=0$) относительно лучей, соответствующих углам внутреннего трения $\varphi=13^\circ$ и $\varphi=20^\circ$. Выполняя расчеты, такую симметрию можно получить при $\mu=0,358$ и $\xi=0,558$. Приняв усредненное значение плотности дорожной одежды по ее толщине $2,1$ т/м³, получим ее усредненный вес $0,020601$ МН/м³, при котором вычислим абсолютные значения напряжения сдвига от веса дорожной одежды.

На рисунке 4 приведены результаты нашего расчета в виде графической зависимости, которая практически идентична номограмме ВСН 46-83.

Таким образом, нами показана возможность вычисления номограммы напряжений сдвига от собственного веса дорожной одежды, представленной в ВСН 46-83, по формуле (17) или ее идентичного аналога (22), который получен из условия пластичности Мора – Кулона. Следовательно, расчеты ранее действо-

вавших нормативных документов ВСН 46-72 и ВСН 46-83 базируются на оригинальном решении А.М. Кривисского, которое полностью соответствует основным правилам механики. Перечисляя достоинства указанных решений, отметим:

1. В основе расчетов обеих составляющих напряжений сдвига лежит одно и то же условие пластичности Мора – Кулона, в котором учтены как максимальные, так и минимальные главные напряжения.

2. Углы внутреннего трения, применяемые для вычисления обеих составляющих напряжений сдвига, имеют одинаковое значение, благодаря чему касательные и нормальные напряжения, используемые в расчетах напряжений сдвига, действуют вдоль и перпендикулярно одной и той же площадке. Вследствие этого возможно применение принципа независимости (суперпозиции) действия сил.

3. В расчете применен принцип суперпозиции силы, состоящий в том, что напряжения сдвига от двух разных сил (транспортная нагрузка и собственный вес дорожной одежды) определяются от каждой силы отдельно, а их результирующая находится суммированием напряжений сдвига от этих нагрузок. Это несложно показать, суммируя отдельно касательные и нормальные напряжения, определяемые в формулах (16) и (18).

$$T_a = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_{1\gamma} - \sigma_{3\gamma}}{2} \right) - \operatorname{tg}\varphi \cdot \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma}}{2} \right). \quad (24)$$

Таблица 4
Критерии расчета по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна, регламентируемые современными нормативными документами

Table 4
Calculation criteria for the shear resistance in the ground of the roadbed, regulated by modern regulatory documents

Нормативный документ, стандарт	Основные расчетные формулы	
	Критерий расчета	Расчет предельных напряжений
ОДН 218.046-01	$T \leq \frac{T_{\text{lim}}}{K_{\text{str}}}$	$T_{\text{lim}} \leq c_N \cdot k_D + 0,1 \cdot \gamma_{\text{cp}} \cdot z \cdot \text{tg}\varphi_1$
<p>T – активное напряжение сдвига, возникающее от воздействия транспортных нагрузок, определяемое по номограмме нормативного документа при угле внутреннего трения φ_N, МПа; T_{lim} – предельное напряжение сдвига, МПа; c_N – значение сцепления после приложения N нагрузок; k_D – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания; γ_{cp} – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя, кг/см³; z – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигустойчивость, от верха конструкции, см; φ_1 – величина угла внутреннего трения при однократном действии нагрузки, градус или радиан; φ_N – величина угла внутреннего трения после приложения N нагрузок, градус или радиан; K_{str} – коэффициент прочности при расчете по сдвигу</p>		
ПНСТ 265-2018	$T \leq \frac{T_{\text{lim}}}{K_{\text{str}}}$	$T_{\text{lim}} \leq k_D \cdot (c_N + 0,1 \cdot \gamma_{\text{cp}} \cdot z \cdot \text{tg}\varphi_1)$
ПНСТ 542-2021		$T_{\text{lim}} \leq k_D \cdot (c_N + 0,001 \cdot \gamma_{\text{cp}} \cdot z \cdot \text{tg}\varphi_1)$
<p>Примечание: разная величина постоянного коэффициента 0,1 и 0,001 объясняется различными единицами измерения параметра γ_{cp}, который в расчете по ПНСТ 265-2018 измеряется в кг/см³, а в ПНСТ 542-2021 в кН/м³</p>		

Анализируя зависимость (24), укажем, что уменьшаемое представляет собой сумму касательных напряжений от временной нагрузки и собственного веса грунта, действующих вдоль площадок сдвига, повернутых к главным осям под углом $\alpha_{\text{ск}} = 45 \pm \varphi / 2 = \pi / 4 \pm \varphi / 2$. Вычитаемое формулы (24) является суммой нормальных напряжений от временной нагрузки и собственного веса грунта, приложенных перпендикулярно к тем же площадкам сдвига. Суммирование компонент тензоров напряжений от временной нагрузки и собственного веса в формуле (24) возможно только потому, что касательные и нормальные напряжения от двух разных сил определены для одной и той же площадки, угол наклона которой к главным осям определяется одинаковым значением угла внутреннего трения.

Эти достоинства позволяют оценить решения А.М. Кривисского и ранее действовавших документов как верные решения, которые относительно законов механики сделаны правильно. К сожалению, рассматривая современные критерии расчета по сопротивлению сдвигу, такого положительного заключения сделать невозможно.

Рассматривая современные решения задачи о сопротивлении сдвигу земляного полотна, приведем критерии расчета, представленные в нормативных документах и стандартах. В таблице 4 приведены современные критерии

расчета по сопротивлению сдвигу, регламентируемые ОДН 218.046-2001, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021.

Рассматривая расчет активных напряжений сдвига от временных нагрузок, выполняемый по правилам ОДН 218.046-01 и ПНСТ 265-2018, отметим, что все вычисления производятся так же, как делается их расчет в ВСН 46-83. В этом несложно убедиться сопоставлением номограмм, представленных на рисунке 35 в ВСН 46-83, рисунке 3.2 в ОДН 218.046-01 и рисунке 6 в ПНСТ 265-2018. На номограмме, представленной на всех этих рисунках, приведена последовательность расчета активного напряжения сдвига от временной нагрузки, выполненная при одних и тех же входных параметрах. При расчете в качестве входных параметров принято $h/D \approx 1,23$, $E_v/E_n = 10$ и $\varphi = 24^\circ$. В результате на всех рисунках получено одно и то же значение активного напряжения сдвига от единичной временной нагрузки (при $p = 1$ МПа), которое равно $\tau = 0,022$.

Последняя модификация этого расчета выполнена в ПНСТ 542-2021. В данном предварительном стандарте традиционная номограмма для определения активного напряжения сдвига от временной нагрузки, связывающая зависимую переменную τ с тремя независимыми переменными h/D , E_v/E_n и φ , почему-то заменена серией графиков. Каждый

из этих графиков является функцией $\tau(h/D; E_v/E_n)$ при конкретном значении φ . Отсюда следует, что разработчики ПНСТ 542-2021, в силу каких-то обстоятельств, не стали применять правила построения номограмм, а ограничились серией графических зависимостей τ от двух переменных, сделав вычисления менее удобными. Выполнив расчет по графику, представленному на рисунке Е31 ПНСТ 542-2021, несложно убедиться, что при тех же входных параметрах ($h/D \approx 1,23$, $E_v/E_n = 10$ и $\varphi = 24^\circ$) величина активного напряжения сдвига от единичной временной нагрузки составит $\tau = 0,026$.

В силу полного совпадения результатов расчета активного напряжения сдвига от временной нагрузки по номограммам ВСН 46-83, ОДН 218.046-01 и ПНСТ 265-2018 и их незначительного отличия от результата расчета по графику ПНСТ 542-2021 (разница около 15 %) можно сказать, что во всех перечисленных нормативных документах активное напряжение сдвига от временной нагрузки вычисляется по одной и той же формуле. Инструкция ВСН 46-83 содержит пункт 3.37, регламентирующий расчет активного напряжения сдвига от временной нагрузки по формуле (3.11) этого документа, которая идентична зависимости (16). Следовательно, расчет по номограммам и графикам, представленным в ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021, основан на этой же формуле, но с той разницей, что в качестве угла внутреннего трения принята величина φ_N . Поэтому для расчета активного напряжения сдвигу по ОДН 218.046-01 и ПНСТ 265-2018, а также ПНСТ 542-2021 справедливой будет формула

$$T = \frac{1}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi_N \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (25)$$

Формула (25) и зависимости таблицы 5, предназначенные для определения предельного напряжения сдвига, можно подставить в критерий прочности по сдвигу в грунте земляного полотна. В этом случае получим:

По ОДН 218.046-01

$$\frac{1}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi_N \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq \frac{c_N \cdot k_d + 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{K_{str}}. \quad (26.1)$$

По ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021

$$\frac{1}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi_N \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq \frac{k_d \cdot (c_N + 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1)}{K_{str}}. \quad (26.2)$$

Неравенства (26.1) и (26.2) можно привести к виду критериев, у которых предельное состояние описывается уравнениями:

По ОДН 218.046-01

$$\frac{1}{k_d} \cdot \left[K_{str} \cdot \left(\frac{1}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi_N \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) - 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \right] \leq c_N. \quad (27.1)$$

По ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021

$$\frac{K_{str}}{k_d} \left(\frac{1}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi_N \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) - 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = c_N. \quad (27.2)$$

Из анализа уравнений предельного состояния (27.1) и (27.2) следует, что в левой части этих условий производятся операции с напряжениями сдвига, действующими на разных площадках, наклоненных к главным осям под различными углами. В подтверждении этого вывода приведем традиционные представления для нахождения угла наклона площадок скольжения главным осям, используя классическую схему, показанную на рисунке 5.

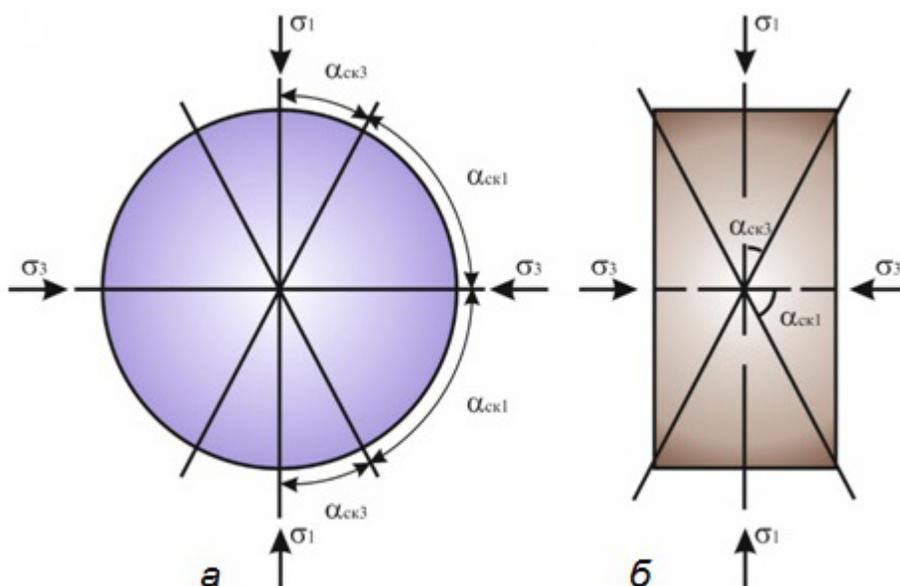


Рисунок 5 – Отклонения площадок скольжения (сдвига) от главных площадок: а – на примере круга напряжений; б – на примере образца

Figure 6. Deviations of the sliding (shear) pads from the main pads: a – on the example of the stress circle; b – on the example of the sample

На рисунке 5 угол α_{ck1} является углом отклонения площадок скольжения от главной площадки, расположенной нормально к направлению максимального главного напряжения σ_1 . Известны различные подходы к решению

задачи о величине углов отклонения площадок скольжения от главных осей, основные зависимости таких решений приведены в таблице 5.

Таблица 5
Формулы для расчета углов наклона площадок сдвига к главным осям [21]

Table 5
Formulas for calculating the angles of inclination of the shear sites to the main axes [21]

Специалисты, применявшие формулу	Формула для определения углов наклона площадок сдвига к главным осям (площадкам)	
	α_{ck1}	α_{ck3}
A. Khasanov, Z. Khasanov [37], Tatsuoka et al. [38], Vardoulakis I. [39]	$\alpha_{ck1} = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ или $\alpha_{ck1} = 45^0 + \frac{\varphi}{2}$	$\alpha_{ck3} = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ или $\alpha_{ck3} = 45^0 - \frac{\varphi}{2}$
Roscoe K.H. [40]	$\alpha_{ck1} = \frac{\pi}{4} + \frac{\psi_d}{2}$ или $\alpha_{ck1} = 45^0 + \frac{\psi_d}{2}$	$\alpha_{ck3} = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi_d}{2}$ или $\alpha_{ck3} = 45^0 - \frac{\psi_d}{2}$
Arthur J.R. et al. [41]	$\alpha_{ck1} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\varphi + \psi_d}{2} \right) = \frac{\pi + \varphi + \psi_d}{4}$	$\alpha_{ck3} = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\varphi + \psi_d}{2} \right) = \frac{\pi - \varphi - \psi_d}{4}$
Muhlhaus H.. et al. [42]	$\alpha_{ck1} = \frac{\pi}{4} + \frac{\nu}{2}, 0 \leq \nu \leq \varphi$	$\alpha_{ck3} = \frac{\pi}{4} - \frac{\nu}{2}, 0 \leq \nu \leq \varphi$

Где φ и ψ_d – соответственно углы внутреннего трения и дилатансии; ν – угол наклона площадки сдвига к главным осям, величина которого не превышает значение угла внутреннего трения, но и не оказывается меньше нуля

Из анализа формул, представленных в таблице 5, следует, что экспериментальные значения углов наклона площадок скольжения к главным осям, при которых происходит разрушение образца при трехосном сжатии, отличается от величин, вычисленных теоретически. Поэтому авторы работ [37, 38, 39, 40, 41, 42] совершенствовали формулы вычисления этих углов наклона.

Первая из формул таблицы 5 предназначена для расчета угла наклона площадок скольжения к главным осям при применении оригинального двухпараметрического критерия Мора – Кулона. Это рассматриваемые нами расчеты. Суть формулы состоит в том, что угол наклона наиболее опасной площадки в критерии Мора – Кулона к главным осям определяется суммой или разностью 45 градусов и половины угла внутреннего трения. Угол наклона площадки скольжения к главным осям в 45 градусов соответствует местоположению площадки, вдоль которой действует максимальное касательное напряжение. Это напряжение вычисляется полуразностью главных напряжений. При нулевом значении угла внутреннего трения угол наклона площадки скольжения к главным осям составит 45 градусов. Это значит, что работает третья теория прочности. В этом случае уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона, например, формула (25), превратится в уравнение предельного состояния третьей теории прочности. Если угол внутреннего трения равен своему гипотетически максимально возможному значению в 90 градусов, то угол наклона площадки скольжения к главным осям равен нулю. В этом случае работает вторая теория прочности, а критерий Мора – Кулона становится неприменим. Таким образом, различные значения угла внутреннего трения, изменяющиеся в диапазоне от 0 до 90 градусов, характеризуют углы наклона к главным осям разных площадок, относительно которых действуют различные касательные и нормальные напряжения. Отсюда следует, что расчет обеих составляющих полного напряжения сдвигу (активных напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса вышележащих слоев) нужно выполнять для одной и той же площадки скольжения, а значит, при одном и том же значении угла внутреннего трения. В противном случае принцип суперпозиции силы неприменим. Расчеты, регламентируемые ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021, противоречат этому выводу.

Вторая зависимость таблицы 5 предназначена для условий пластичности, в которых од-

ним из параметров материала является угол дилатансии ψ_d . Правила определения угла дилатансии сформулированы в работах М.Д. Болтона [43] и применяются вплоть до настоящего времени [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]. Особенностью вычисления угла дилатансии является возможность его расчета через критическое значение угла внутреннего трения. Например, в модели Hardening Soil угол дилатансии песков средней плотности определяется углом внутреннего трения за вычетом 30 градусов [49], поэтому для одной и той же площадки сдвига величина угла дилатансии постоянная. Выполнение этого условия при расчете угла дилатансии через величину угла внутреннего трения требует применение одного и того же критического значения φ . Расчет напряжений сдвигу от двух разных нагрузок по любому из условий пластичности с параметром в виде угла дилатансии должен выполняться при одном и том же значении угла наклона площадки сдвига к главным осям. В этом случае вычисление угла наклона площадки сдвига к главным осям для каждой из двух нагрузок необходимо использовать одинаковые величины угла дилатансии и одно и то же критическое значение угла внутреннего трения. Здесь отметим, что $\psi_d < \varphi$, вследствие чего угол наклона площадок скольжения $\alpha_{скз}$ (см. рисунок 5) к главной оси 1 в условии пластичности Мора – Кулона меньше, чем в критериях пластичности с параметром материала в виде угла дилатансии ψ_d .

Третья и четвертая формулы таблицы 5 не привязаны к какому-либо условию пластичности, но позволяют получать результаты, наиболее близкие к данным эксперимента. В работе [41] для вычисления угла наклона площадок скольжения к главным осям постулирована гипотеза, согласно которой эти углы определяются суммой или разностью 45 градусов и половины угла, величина которого находится как среднее значение углов внутреннего трения и дилатансии. Поэтому согласно гипотезе авторов работы [41] угол наклона площадки скольжения $\alpha_{скз}$ (см. рисунок 5) определяется средним значением этого угла в условии пластичности Мора – Кулона и критериев с параметром материала в виде угла дилатансии. Данную гипотезу можно рассматривать как уточнение местоположения площадок скольжения относительно главных осей. Тем не менее первые два вывода, сделанные нами выше, приводят к тому, что определение напряжений сдвига от двух разных нагрузок должны выполняться для одной и той

же площадки скольжения, то есть при одинаковых значениях углов внутреннего трения и дилатансии.

Формула, рекомендованная в работе [42], постулирует возможность варьирования величины угла наклона площадок скольжения от 45 градусов (при $v=0$) до минимального, равного углу наклона площадок сдвига в критерии Мора – Кулона (при $v=\varphi$). Но для одной и той же площадки сдвига этот угол имеет только одно значение, то есть возможно только одно неравенство либо $0 \leq v \leq \varphi$, либо $0 \leq v \leq \varphi_N$. В этом случае расчет напряжений сдвига для обеих нагрузок (транспортной и веса дорожной одежды) должен выполняться при одной и той же величине угла наклона площадки скольжения, определяемой через параметр v , максимальное значение которого не может превышать либо φ , либо φ_N .

Рассмотренные нами методы вычисления углов наклона площадок скольжения к главным осям говорят о том, что расчеты напряжений сдвига от разных нагрузок с последующим применением принципа суперпозиции сил должны выполняться для одной и той же площадки. В случае применения критерия Мора – Кулона расчет активных напряжений сдвига от разных нагрузок необходимо производить при одинаковом угле внутреннего трения.

Учитывая изложенные выводы, отметим, что в неравенствах (27.1) и (27.2) производятся операции с напряжениями от подвижной нагрузки и собственного веса, действующими на разные площадки. Следовательно, любой из современных расчетов по ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 или ПНСТ 542-2021 в части оперирования с компонентами тензоров напряжений, действующих на разных площадках, противоречит основам дисциплины «Соппротивление материалов». По нашему мнению, такая путаница могла возникнуть по двум причинам. Первой причиной могли стать предположения, что при определении напряжения сдвига от собственного веса грунта основание работает в условиях гидростатического сжатия. Второй причиной могли являться рассуждения о возможности применимости предельной прямой Кулона для вычисления предельного напряжения сдвига. Рассмотрим обе эти идеи.

В первом случае предпримем попытку привести решение А.М. Кривисского к виду его современных модификаций, изложенных в ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021. Для этого запишем уравнение предельного состояния Мора – Кулона в форме В.В. Соко-

ловского для реального грунта, обладающего сцеплением и углом внутреннего трения. Полное напряжение сдвига определим, используя принцип суперпозиции силы, то есть по формуле (15). Составляющие полного напряжения сдвига вычислим по формулам (16) и (18). Также отметим, что все главные напряжения определены для главных площадок в точке, принадлежащей оси симметрии нагрузки. В этом случае направление главных осей и осей декартовой системы координат совпадает. Поэтому компоненты эквивалентного напряжения критерия Мора – Кулона от разных нагрузок можно суммировать.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{\sigma_{1\gamma} - \sigma_{3\gamma}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma}}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi = c. \quad (28.1)$$

Теперь для приведения уравнения (28.1) к виду критериев, применяемых для расчета дорожных одежд, в него необходимо ввести коэффициенты k_d и K_{str} . Предварительно оговорим, что напряжение сдвига от собственного веса слоев, расположенных над расчетной точкой, не являются характеристикой прочности. Это напряжения, и они учитываются применением принципа суперпозиции силы путем его сложения с напряжением от временной нагрузки. Такое утверждение требует строго определенного алгоритма действий с уравнением (28.1). Соблюдая этот алгоритм, вначале в уравнение (28.1) нужно ввести коэффициенты k_d и K_{str} , и только потом можно будет перенести напряжения сдвига от веса слоев из левой части уравнения (28.1) в его правую часть. Вводя коэффициент k_d , примем положение нормативных методов расчета, полагающих, что сцепление песчаных грунтов можно повысить устройством поверх песчаного слоя цементогрунтового основания или укладкой геосинтетического материала. Здесь сделаем оговорку, что в настоящей работе мы не рассматриваем правильность этого положения, мы его принимаем, чтобы привести уравнение (28.1) к виду современных критериев. Поэтому точно также, как это выполнено в современных нормах, сцепление умножим на коэффициент k_d . Второй коэффициент K_{str} является коэффициентом запаса. Поэтому коэффициент K_{str} можно ввести либо в виде множителя в левую часть уравнения (28.1), либо в виде делителя правой части этого уравнения. Сделаем это, получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi + \frac{\sigma_{1\gamma} - \sigma_{3\gamma}}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma}}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi = \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} \quad (28.2)$$

Теперь в уравнении (28.2) определим главные напряжения от собственного веса материалов слоев, расположенных над рассматриваемой точкой. Главные напряжения вычислим по формулам (19) с учетом формулы (23), в которой примем $\mu=0,5$. Тогда главные напряжения $\sigma_{\gamma 1}$ и $\sigma_{\gamma 3}$ будут равны друг другу и равняться давлению, передаваемому вышележащими слоями. В этом случае, до приведения подобных, уравнение (28.2) примет вид

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi + \frac{\gamma_{cp} \cdot z - \gamma_{cp} \cdot z}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\gamma_{cp} \cdot z + \gamma_{cp} \cdot z}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi = \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} \quad (28.3)$$

В уравнении (28.3) содержатся равные по величине главные напряжения $\sigma_{\gamma 1} = \sigma_{\gamma 3} = \gamma_{cp} \cdot z$. При этом размерность γ_{cp} принята МН/м³, что объясняет отсутствие постоянных коэффициентов, которые содержатся в формулах таблицы 4. В данном случае эти множители размерности не нужны. Главные напряжения $\sigma_{\gamma 1} = \sigma_{\gamma 3} = \gamma_{cp} \cdot z$ можно сложить с главными напряжениям σ_1 и σ_3 . Причем суммируем отдельно максимальные и минимальные главные напряжения, то есть σ_1 складывается с $\sigma_{\gamma 1}$, а $\sigma_{\gamma 3}$ прибавляется к σ_3 .

$$\frac{\sigma_1}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi}{2} + \frac{\gamma_{cp} \cdot z}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi}{2} - \frac{\sigma_3}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_3 \cdot \operatorname{tg}\varphi}{2} - \frac{\gamma_{cp} \cdot z}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi}{2} = \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} \quad (28.4)$$

Зависимость (28.4) демонстрирует применение принципа суперпозиции силы, в котором первые четыре члена содержат максимальные главные напряжения, а другие четыре члена левой части этого уравнения содержат минимальные главные напряжения. Приведем подобные, получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi - \frac{2 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi}{2} = \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} \quad (28.5)$$

Укажем, что уравнение (28.5) можно было получить приведением подобных в зависимости (28.3), но более длинный путь, продемонстрированный нами в уравнении (28.4), раскрывает суть принципа суперпозиции силы. Третий член левой части уравнения (28.5) представляет собой удвоенное нормальное напряжение от собственного веса дорожной одежды, действующее перпендикулярно площадке сдвига, повернутой к главным осям под углами $45 \pm \varphi/2$. Этот член уравнения (28.5) численно равен четвертому члену левой части уравнения (28.3). Касательная составляющая напряжения сдвига от собственного веса дорожной одежды равна нулю, она в уравнении (28.3) приведена в левой части в виде третьего члена. В уравнении (28.5) эта составляющая не записана.

Теперь третий член левой части уравнения (28.5) перенесем в его правую часть, и не забудем сократить двойку.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos\varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi = \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} + \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (28.6)$$

Выполняя последнее преобразование уравнения (28.6), в критерий прочности поменяем знак равенства на знак меньше или равно, а левую часть уравнения обозначим T . В этом случае получим

$$T \leq \frac{k_d \cdot c}{K_{str}} + \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (28.7)$$

Сравнивая критерий (28.7) с критерием прочности ОДН 218.046-01, представленный в таблице 4, несложно заметить их отличие. В развернутом виде критерий ОДН 218.046-01 имеет вид неравенства

$$T \leq \frac{c_N \cdot k_d + 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\varphi_1}{K_{str}} \quad (28.8)$$

Если в критерии (28.7) и (28.8) ввести одну и ту же размерность γ_{cp} , а параметры прочности грунта c и φ принять одинаковыми, то эти критерии будут математически различны по применению K_{str} в качестве делителя. Причем, как нами показано, неравенство (28.7) является верным, а неравенство (28.8) – ошибочным. Суть ошибки состоит в том, что при преобразовании исходного уравнения (28.1) в критерий прочности (28.8) алгоритм вывода этого критерия был нарушен. Вначале к сцеплению перенесли напряжение сдвига от собственного веса грунта, а затем ввели коэффициент прочности K_{str} .

Ошибочная запись критерия сопротивления по сдвигу в виде неравенства (28.8) стала основой последующих ошибок, допущенных в ПНСТ 265-2018. Коварность неравенства (28.8) состоит в том, что его числитель можно ошибочно принять за уравнение предельной прямой Кулона. Тогда, казалось бы, будет логичным коэффициент k_d ввести общим множителем к уравнению этой «якобы» прямой Кулона. Следовательно, критерий (28.8) нужно исправить и записать его в виде

$$T \leq \frac{k_d \cdot (c_N + 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1)}{K_{str}}. \quad (28.9)$$

В ПНСТ 542-2021 изменена размерность объемного веса дорожной одежды γ_{cp} , его единица измерения принята в кН/м^3 . В этом случае критерий (28.9) принял свой окончательный вид, он записан в виде

$$T \leq \frac{k_d \cdot (c_N + 0,001 \cdot \gamma_{cp} \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi_1)}{K_{str}}. \quad (28.10)$$

К вопросу о размерности γ_{cp} отметим, что если ее принять МН/м^3 , а размерность z взять в м, то коэффициентов размерности вводить не надо, оба слагаемых в критериях (28.8), (28.9) и (28.10) будут измеряться в МПа.

Выводом критерия (28.7) из исходного уравнения (28.1) нами показано, что в неравенстве (28.8) числитель не является уравнением предельной прямой Кулона. Тем не менее рассмотрим вывод уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона из уравнения предельной прямой Кулона. При этом покажем тождественность этих двух уравнений. По нашему мнению, такая информация востребована в среде специалистов дорожной отрасли. Это мнение подтверждается утверждением некоторых специалистов, что в земляном полотне сдвиг направлен вниз и в сторону. По всей видимости это заблуждение обусловлено путанным пониманием уравнения Кулона и его приложения к опыту по одноплоскостному срезу, в котором нагрузка прикладывается вертикально и горизонтально.

Рассмотрим предельную прямую Кулона, уравнение которой записывается в общем виде и в виде, применяемом в опытах по одноплоскостному срезу. Общий вид уравнения предельной прямой Кулона, построенной в τ - σ плане:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (29.1)$$

где τ и σ – касательное и нормальное напряжения, действующие вдоль и перпендикулярно площадкам скольжения, показанным на рисунке 5, Па.

Уравнение предельной прямой Кулона в опыте по одноплоскостному срезу:

$$\tau = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (29.2)$$

где p – давление, приложенное перпендикулярно плоскости среза, заложенной в опыте зазором между двумя кольцами (сдвигаемым и неподвижным), в которых размещен образец грунта, Па.

Рассматривая уравнения (29.1) и (29.2), отметим, что они аналогичны и по сути $\sigma = p$. Такое равенство констатируется в ГОСТ 12248–2010 (см. подраздел 5.1.6 формулы (5.5) и (5.6)). Но прибор прямого среза относительно системы координат, показанной на рисунке 5, повернут на угол $\alpha_{ск1}$. Этот поворот выполнен так, что вектор сил, обуславливающих возникновение σ и p , применяемых в уравнениях (29.1) и (29.2), совпадает с направлением силы тяжести. Поэтому в опытах по одноплоскостному срезу давление p определяется отношением нормальной силы F к площади образца A (см. формулу (5.4) ГОСТ 12248–2010). Так как в опыте по одноплоскостному срезу направление силы F совпадает с направлением силы тяжести, то есть всегда к центру земли (вертикально вниз), то методика эксперимента абсолютно верная. Но, принимая во внимание поворот плоскости среза относительно главных осей, необходимо учитывать, что в уравнениях (29.1) и (29.2) всегда имеет место равенство $\sigma = p$. При этом касательное напряжение τ приложено вдоль площадки сдвига под прямым углом к напряжению $\sigma = p$. Поэтому в главных осях нормальная составляющая напряжения уравнения Кулона σ или p определяется по формуле

$$\sigma = p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (29.3)$$

Таким образом, напряжение σ , вычисляемое по зависимости (29.3), представляет собой нормальное напряжение, действующее перпендикулярно площадке, вдоль которой действует максимальное касательное напряжение, вычисляемое по известной зависимости

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (29.4)$$

Подстановка зависимости (29.3) в уравнение предельной прямой Кулона приведет к тому, что нормальная компонента напряжения будет зависеть от угла внутреннего трения и определяться по формуле

$$\sigma = p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (29.5)$$

Отсюда следует, что при подстановке в уравнение предельной прямой (29.1) или (29.2) зависимости (29.3) необходимо переориентировать либо сцепление, либо касательную составляющую эквивалентного напряжения. Выполняя такую переориентацию, уравнение предельной прямой получим в виде, рекомендованном И.Е. Евгеньевым и В.Д. Казарновским²⁰ (см. стр. 101 этой книги):

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi. \quad (29.6)$$

Безусловно, что обе части уравнения (29.6) можно разделить на косинус угла внутреннего трения. Тогда получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} + c. \quad (29.7)$$

Уравнение (29.7) можно преобразовать в уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона. Для этого нормальную компоненту напряжения переносим в левую часть, а отношение синуса к косинусу угла внутреннего трения представляем тангенсом этого угла. В этом случае получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi = c. \quad (29.8)$$

Сравнивая выражение (29.8) с уравнением предельного состояния критерия Мора – Кулона для реального грунта, представленного в таблице 3, несложно убедиться в тождественности этих двух формул. Таким образом, правильная модификация уравнений предельной прямой Кулона (29.1) или (29.2), вытекающая из анализа построения кругов напряжений Мора, приводит к тождественному уравнению прямой (29.8), записанному в главных напряжениях. В этих уравнениях угол внутреннего трения φ является углом наклона прямой к оси абсцисс, на которой отложены значения нормальных напряжений.

Проблема нормативных решений по ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 или ПНСТ 542-2021 состоит в том, что в одном и том же критерии наклон предельной прямой задан разными углами φ_N и φ_1 соответственно. Эти два угла наклона являются параметрами двух разных уравнений прямых, интерпретирующих напряженное состояние на разных площадках.

Кроме того, можно показать, что в части определения напряжения сдвига от собственного веса дорожной одежды нормативные расчеты ошибочны. Эта ошибка связана с положением о работе грунта земляного полотна, воспринимающего нагрузку от дорожной одежды, в условиях гидростатического сжатия. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

При воздействии на грунтовое основание нагрузки в виде веса от вышележащих слоев, давление возрастает с глубиной. В большинстве случаев любое горизонтальное сечение земляного полотна воспринимает нагрузку, распределенную равномерно. Поверхность земляного полотна загружена весом дорожной одежды, а основание насыпи воспринимает давление от веса дорожной одежды и насыпи. Увеличение давления по глубине насыпи происходит линейно. В пределах каждого горизонтального сечения давление на земляное полотно одинаковое. Значит, грунт испытывает компрессионное сжатие, не претерпевая горизонтальных деформаций. В этом случае главные деформации в точке, принадлежащей оси симметрии нагрузки, вычисляются физическими уравнениями теории упругости, но при замене продольного модуля упругости его аналогом, модулем деформации. В этом случае, считая грунт изотропным и линейно-деформируемым, для минимальных главных деформаций ε_2 и ε_3 справедливыми будут формулы:

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_d} \cdot [\sigma_{2\gamma} - \mu \cdot (\sigma_{1\gamma} + \sigma_{3\gamma})] = 0; \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E_d} \cdot [\sigma_{3\gamma} - \mu \cdot (\sigma_{1\gamma} + \sigma_{2\gamma})] = 0. \end{aligned} \quad (30.1)$$

При компрессионном сжатии промежуточное $\sigma_{2\gamma}$ и минимальное $\sigma_{3\gamma}$ главные напряжения равны, но они меньше максимального главного напряжения $\sigma_{1\gamma}$. В этом случае достаточно воспользоваться только одной формулой, положив в ней $\sigma_{2\gamma} = \sigma_{3\gamma}$. Рассмотрим вторую

²⁰ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. М. : Транспорт, 1976. 336 с.

формулу (30.1), в которой избавимся от модуля деформации, перенеся его в правую часть и помножив на 0, и раскроем круглые скобки, помножив главные напряжения на коэффициент Пуассона. Сделав это, получим

$$\sigma_{3\gamma} - \mu \cdot \sigma_{1\gamma} - \mu \cdot \sigma_{3\gamma} = 0. \quad (30.2)$$

Уравнение (30.2) приводится к виду

$$\sigma_{3\gamma} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_{1\gamma}. \quad (30.3)$$

Первый множитель правой части уравнения (30.3) в механике грунтов называют коэффициентом бокового давления, а в механике горных пород коэффициентом бокового распора или коэффициентом А. Динника. Выполненные нами рассуждения при преобразовании уравнений (30.1) в уравнение (30.3) – это и есть гипотеза А. Динника (закон упругости).

В механике горных пород есть и другие гипотезы. А. Гейм ввел положение, согласно которому все три главных напряжения равны, то есть $\sigma_{1\gamma} = \sigma_{2\gamma} = \sigma_{3\gamma}$ (закон гидростатики). А. Гейм считал, что горные породы на протяжении большого времени (много миллионов лет) текут с малой скоростью подобно жидкости с очень высокой вязкостью, в результате чего их природное напряженное состояние выравнивается. Обе гипотезы применяются, но для разных случаев. Если рассматривать земляное полотно автомобильных дорог, то оно построено из грунтов искусственно уплотненных (насыпи, выемки и в нулевых отметках). Грунт для насыпей предварительно разработан, что сводит к нулю влияние процессов, протекавших в нем до разработки. При проектировании земляного полотна применяются не все грунты, например, предусматривается замена слабого грунта или мероприятия его стабилизации. Рассчитываемая по сдвигу точка лежит на поверхности земляного полотна, воспринимающая нагрузку от дорожной одежды в течение ее срока службы. По геологическим меркам это ничтожный период времени. Кроме того, грунты в активной зоне земляного полотна подвергаются процессам набухания, усадки, морозного пучения с весенним распучиванием, деформирования от транспортных нагрузок. Все эти воздействия приводят к изменению структуры грунта и влияют не только

на земляное полотно и его поверхность, но и дорожные одежды, в том числе покрытие [51]. Учитывая перечисленные факторы, предпочтение следует отдать гипотезе А. Динника, что сделал А.М. Кривисский в своем методе. Ведь специалисты в области расчета дорожных конструкций рассматривают механику слоев из монолитных и зернистых материалов, а также механику грунтов применительно к поверхности земляного полотна. В качестве еще одного аргумента отметим, что в механике горных пород известны и другие гипотезы о природном давлении. Например, известно предложение С.В. Михлина, заключающееся в необходимости представления минимального главного напряжения двучленной зависимостью $\sigma_{3\gamma} = a \cdot \sigma_{1\gamma} + b$. Эта гипотеза наиболее точно отражает многообразие природных напряженных состояний нетронутых грунтовых массивов. Она применяется специалистами добывающей промышленности, но вследствие отсутствия необходимости, она не используется в строительстве. Поэтому наш случай – это гипотеза А. Динника.

В механике грунтов разработаны модели для определения коэффициента бокового давления через функции угла внутреннего трения. В настоящее время известно достаточно большое количество таких зависимостей, они разработаны для первичного и вторичного напряжения. Указанные формулы приведены в работах [52, 53, 54, 55]. На рисунке 6 даны результаты расчета по наиболее часто применяемым формулам.

Из анализа графиков, представленных на рисунке 6, следует, что в большинстве моделей коэффициент бокового давления равен единице тогда, когда угол внутреннего трения имеет нулевое значение. В нормах и стандартах РФ угол внутреннего трения не равен нулю. Более того, значение угла внутреннего трения, принимаемое в расчете напряжений от собственного веса, имеет наибольшее значение. Следовательно, данные рисунка 6 исключают применение гипотезы А. Геймса в расчетах дорожных одежд по сопротивлению сдвигу в грунте.

Обратим внимание на методику расчета дорожных одежд переходного типа, предназначенных для дорог с низкой интенсивностью движения, регламентируемую ГОСТ Р

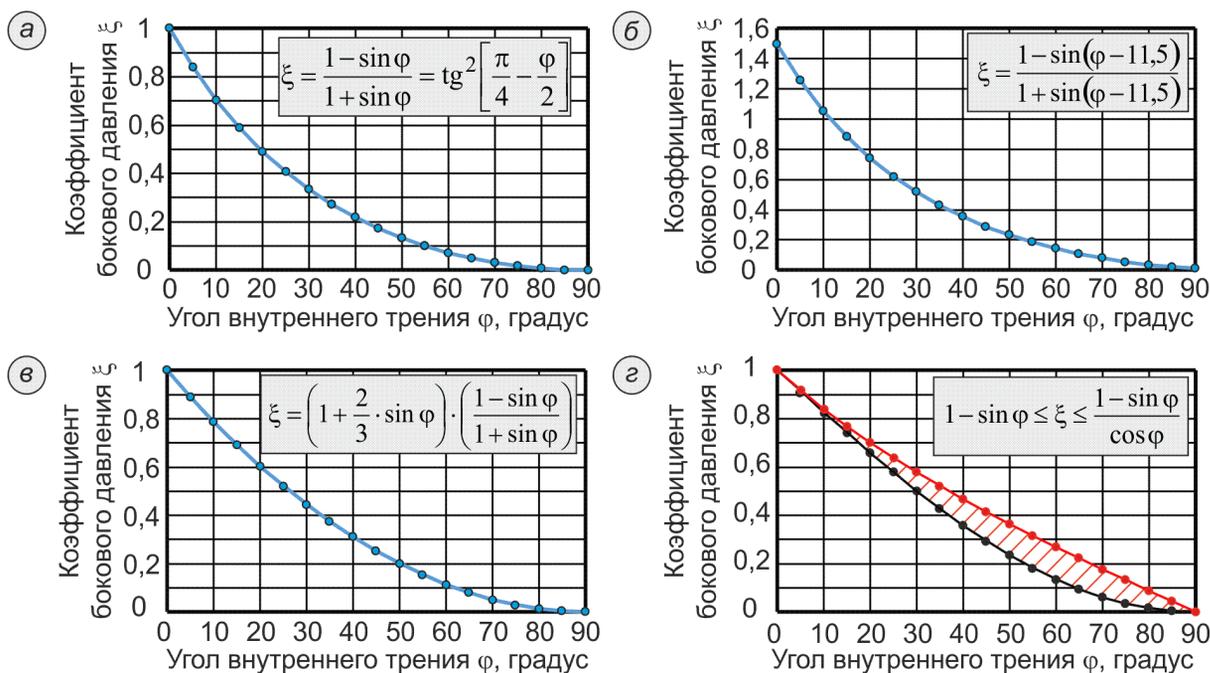


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента бокового давления от угла внутреннего трения: а – Ж. Биареза; б – М. Болтона; в – Жаки – Михайловского; г – Ж. Жаки (пределы варьирования)

Figure 6 – Dependence of the lateral pressure coefficient on the angle of internal friction:

58818–2020²¹ и ПНСТ 371–2019²². Расчет таких дорожных одежд выполняют по критериям прочности и эксплуатационной надежности, обеспечивая требуемый модуль деформации конструкции и не допуская образования колеи, глубина которых превышает предельные значения. Расчет по модулю деформации базируется на методе, предложенном Н.Н. Ивановым и его учениками. Этот метод основан на определении упругопластического смещения поверхности двухслойной системы путем интегрирования по глубине функции вертикальной деформации, которая возникает от нормального вертикального напряжения σ_z . Это напряжение является напряжением сжатия и представляет собой функцию глубины, определяемую формулой М.И. Якунина. Таким образом, методика расчета дорожных одежд переходного типа по ПНСТ 371-2019 предполагает их работу на одноосное сжатие, что противоречит основам механики грунтов и не соответствует современным решениям, в которых рассматривается трехосное сжатие грунтов и зернистых материалов. В решении

Н.Н. Иванова зависимость упругопластического смещения поверхности двухслойной системы от давления линейная. Следовательно, предполагается, что грунты и зернистые материалы испытывают деформации, отнесенные на рисунку 1 к фазе уплотнения. Эта фаза деформирования основания ограничена по величине давления первой критической нагрузкой p_{lim} , при превышении которой осадка нелинейно зависит от давления. При расчете остаточной деформации по методике ПНСТ 371-2019 предполагается, что необратимая деформация прямо пропорциональна давлению и диаметру отпечатка нормативной нагрузки. Это известная формула, которая предполагает линейную зависимость между упругопластической осадкой и давлением. Тем не менее величина давления на покрытие дорожной одежды переходного типа достаточно высокая, она составляет 0,6 МПа, что может привести к нелинейной зависимости остаточной деформации от давления. Таким образом, в методике расчета по требованиям ПНСТ 371-2019 нет инструмента, ограничива-

²¹. ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 01.07.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020. 36 с.

²². ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

ющего область применения линейных зависимостей осадок от давления. Безусловно, что таким инструментом может являться расчет по первой критической нагрузке или расчет по полным напряжениям сдвига, вычисленным из оригинального критерия Мора – Кулона для площадки, проведенной через наиболее опасную точку.

Расчет по сопротивлению сдвигу методике ПНСТ 371-2019 остро необходим, именно этот расчет обуславливает применимость линейной зависимости упругопластической или остаточной деформации от давления. Механизм расчета состоит в том, что в случае невыполнения критерия устойчивости к сдвигу в грунте необходимо увеличивать толщину слоя (слоев) дорожной одежды или заменять материал слоя материалом с большим модулем деформации. При реализации любого из этих двух изменений в конструкции дорожной одежды давление на земляное полотно уменьшится, уменьшатся главные напряжения и девиатор напряжений. Достаточность изменений в конструкции дорожной одежды устанавливается возникновением предельного состояния по критерию сопротивления сдвигу. Так как в основе критерия сопротивления сдвигу лежит условие пластичности Мора – Кулона, то можно утверждать, что при предельном состоянии в наиболее опасной точке земляного полотна давление, воспринимаемое его поверхностью, равно первой критической нагрузке, которая является мерой применения линейной зависимости упругопластической осадки от давления.

Методику ПНСТ 371-2019 необходимо дополнять расчетом по сопротивлению сдвигу или расчетом по первой критической нагрузке. Это обязательно нужно сделать. Кроме того, расчетные формулы постулируют зависимость осадок от давления, а не их зависимость от главных напряжений или шаровой и девиаторной компоненты тензора напряжений. В результате нет возможности определения величины модуля деформаций от напряжений. Это противоречит процитированным нами работам [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], в которых продольные, объемные и поперечные аналоги модулей упругости (деформации) связаны с напряжениями нелинейными зависимостями. Отметим, что работы [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] являются лишь малой толикой работ, в которых приведены аналогичные нелинейные зависимости аналогов упругих постоянных от величины главных напряжений, среднего напряжения и девиато-

ра. Это свидетельствует о том, что методику расчета дорожных одежд переходного типа по ПНСТ 371-2019 необходимо как минимум дополнять расчетом по сопротивлению сдвигу, а как максимум полностью перерабатывать с выводом новых формул для определения глубины колеи и с постановкой экспериментов по трехосному сжатию грунтов повторными нагрузками. В противном случае для ряда условий будут построены дорожные одежды недостаточной толщины или жесткости, которые будут иметь срок службы меньше заложенного при проектировании.

Таким образом, выполненный нами анализ показывает несостоятельность любого из современных стандартов и нормативов в части расчета грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из выполненного анализа можно сделать вывод, что коллективы авторов, разработавших современные методики расчета грунтов земляного полотна и слоев дорожных одежд из слабосвязных материалов по критерию сопротивления сдвигу, изложенные в ОДН 218.01-046, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021, стремились:

Увеличить активное напряжение сдвига от временной подвижной нагрузки. Это подтверждается введенной в ОДН 218.01-046 зависимостью угла внутреннего трения от количества приложенных расчетных нагрузок. Согласно этой зависимости в результате увеличения числа приложенных нагрузок величина угла внутреннего трения уменьшается. Так как эквивалентное напряжение в критерии Мора – Кулона возрастает при уменьшении угла внутреннего трения, то это напряжение сдвига возрастает и при увеличении числа приложенных нагрузок.

Уменьшить сцепление грунта при увеличении числа приложенных расчетных нагрузок, введя в нормативы и стандарты соответствующую функцию, заданную таблично.

Модифицировать расчет активного напряжения сдвига от собственного веса материалов конструктивных слоев дорожной одежды, заменив гипотезу А. Динника, постулируемую в решении А.М. Кривисского, на гидростатический закон А. Геймса. В этом случае полное напряжение сдвига уменьшается.

Таким образом, первые два мероприятия ведут к увеличению полного напряжения сдвига и уменьшению сцепления (прочности), а третья модификация, наоборот, уменьша-

ет полное напряжение сдвига или повышает прочность.

Рассматривая функцию уменьшения сцепления грунтов при увеличении числа приложенных расчетных нагрузок, заданную в современных стандартах и нормах таблично, отметим, что с этим предложением нужно согласиться. Это предложение в полной мере соответствует учению Н.Н. Маслова, в котором сцепление представлено суммой двух составляющих структурным сцеплением (необратимая часть) и сцеплением связности (восстанавливаемая часть). Структурное сцепление необратимо и исчезает при воздействии нагрузки, а сцепление связности является обратимой частью общего сцепления. Отсюда следует, что в процессе увеличения числа приложенных нагрузок структурное сцепление уменьшается до тех пор, пока не достигнет нулевого значения, после чего прочность грунта в условии Мора – Кулона обусловлена только сцеплением связности. Согласно трактовке нормативных документов и стандартов сцепление принимает минимальное и неизменное значение при реализации миллиона расчетных нагрузок, то есть, при реализации миллиона повторных нагрузок структурное сцепление исчерпано полностью, а прочность грунта обусловлена сцеплением связности, или, как еще говорят, остаточным сцеплением. Остаточное сцепление экспериментально определяют методом одноплоскостного среза «плашка по плашке», но его нельзя определить трехосными КН или КД испытаниями. Здесь отметим, что в этой части мы сталкиваемся не с теоретической, а с экспериментальной проблемой.

Рассматривая аналогичную зависимость угла внутреннего трения от числа приложенных нагрузок, вывод о ее применимости получился неоднозначный. Это связано с тем, что величина угла внутреннего трения при вычислении активных напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса вышележащей конструкции должна быть одинаковой. Отсюда следует, что вычисление этих обоих активных напряжений сдвига должно производиться либо при угле внутреннего трения φ_N , либо при угле внутреннего трения φ_{cr} . То есть в обоих расчетах активных напряжений сдвига нужно либо учитывать повторность приложения нагрузок, либо, наоборот, не учитывать.

Таким образом, нами установлено, что решение А.М. Кривисского и его модификации, изложенные в ВСН 46-72 и ВСН 46-83, соответствуют основам механики, в частности

механики грунтов. Современные расчеты, регламентируемые ОДН 218.046-01, ПНСТ 265–2018 и ПНСТ 542–2021 таким достоинством не обладают, а в части расчета активного напряжения сдвига от собственного веса слоев, лежащих выше рассматриваемого слоя или полупространства, противоречат фундаментальным представлениям механики грунтов. Это замечание также касается применения разных значений угла внутреннего трения при расчете составляющих полного напряжения сдвигу, а именно активных напряжений сдвига от временной нагрузки и веса вышележащих слоев.

Тем не менее рассмотренные нами первые решения задачи о сопротивлении сдвигу в грунте земляного полотна, полученные А.М. Кривисским и авторами ВСН 46-72 и ВСН 46-83, содержат определенные недостатки:

1. Согласно рисунку 1 каждой критической нагрузки соответствует определенная осадка, поэтому первой критической нагрузки соответствует определенная величина осадки основания. Эта осадка может соответствовать предельным осадкам зданий, но быть больше предельных значений неровностей покрытия дорог. В этом случае расчет по сопротивлению сдвигу, обеспечивая прочность грунта в наиболее опасной точке по критерию Мора – Кулона, является бесполезным для обеспечения ровности покрытия дорожной одежды и ее устойчивости к колееобразованию. Следовательно, расчет по сопротивлению сдвигу необходимо выполнять по другому условию пластичности, в котором эквивалентное напряжение больше напряжения сдвига в критерии Мора – Кулона и дополнить расчетом по глубине колеи и накаливаемой остаточной деформации.

2. Согласно рисунку 1 при давлениях, равных первой критической нагрузке, их связь с осадкой остается линейной. Тем не менее рассматривая зависимость вертикальной деформации от главных напряжений, получаемую в опытах по трехосному сжатию, нужно заметить, что при достижении предельного состояния по критерию Мора – Кулона зависимость деформации от девиатора напряжений нелинейная. Это необходимо учитывать при выводе формулы расчета осадки в зависимости от величины напряжений. Такой вывод состоит в интегрировании по глубине функциональной зависимости вертикальной деформации от главных напряжений.

3. В ранее действовавших инструкциях ВСН 46-72 и ВСН 46-83 расчет активного напряжения сдвига от собственного веса грунта

выполнялся графическим способом по номограмме, подобной графику, показанному на рисунке 4. В связи с этим входные параметры, принимаемые для расчета, являются осредненными и не соответствуют рассматриваемому грунту. Для повышения точности расчета активное напряжение сдвигу от собственного веса грунта следует рассчитывать по формуле (17) или графикам, показанным на рисунке 3.

В настоящей работе поставим цель разработки нового решения задачи о сопротивлении сдвигу грунтов земляного полотна и песчаных слоев дорожных одежд. При этом будем стремиться к тому, чтобы в новом решении величина полного напряжения сдвига была больше, чем в аналогичном расчете, базирующемся на оригинальном критерии Мора – Кулона.

Отметим, что повышения величины полного напряжения сдвига можно добиться модификацией оригинального критерия пластичности Мора – Кулона. Ниже поясним предлагаемую нами модификацию и приведем формулы для расчета активных напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса слоев дорожной одежды и формулы для расчета безопасных давлений.

В качестве отправной идеи рассмотрим критерий прочности Мора, который запишем, как это принято в учебниках по дисциплине «сопротивление материалов», для случая растяжения твердого тела, обладающего пределами прочности на сжатие R_c и растяжение R_t , а именно в виде неравенства

$$\sigma_1 - k_M \cdot \sigma_3 \leq R_t; \quad k_M = R_t / R_c. \quad (31.1)$$

Грунтовые основания и слои дорожных одежд из зернистых материалов, в том числе песков, работают в условиях трехосного сжатия, поэтому критерий (31.1) необходимо записать для сжатия. В этом случае главные напряжения принимаются с обратным знаком. Предел прочности на растяжение R_t , расположенный в правой части неравенства (31.1), заменяется пределом прочности на сжатие R_c , который принимают тоже с обратным знаком, то есть со знаком «минус». При определении коэффициента k_M числитель и знаменатель меняют местами, но без изменения знака дроби. Последнее обусловлено тем, что переменная мест числителя и знаменателя равносильна возведению первоначальной дроби в минус первую степень (нечетное число показателя степени), что не приводит к изменению знака дроби. Поясняя более подробно, укажем, что в неравенстве (31.1) знак при коэффициенте

k_M определен отношением положительной величины R_t к отрицательному значению R_c , а при перевороте дроби отрицательная величина R_c делится на положительное значение R_t . В обоих случаях знак перед коэффициентом k_M всегда минус. Тем не менее умножение отрицательной величины коэффициента k_M на отрицательное минимальное главное сжимающее напряжение σ_3 приведет к изменению знака, вычитаемого в неравенстве (31.1) с минуса на плюс. Пояснив все изменения, критерий (31.1) запишем для сжатия в виде неравенства

$$-\sigma_1 + k_M \cdot \sigma_3 \leq -R_c; \quad k_M = R_c / R_t. \quad (31.2)$$

Так как грунты и зернистые материалы работают в условиях трехосного сжатия, то главные напряжения всегда являются сжимающими в любой точке полупространства или слоя конечной толщины. Это утверждение справедливо для любой области массива грунта (области с активным и пассивным ренкиновским состоянием, а также переходная область). Поэтому оперировать с отрицательными значениями главных напряжений, как это имеет место в критерии (31.2), неудобно. В этом случае целесообразно сделать обратную замену знаков, приняв сжимающие главные напряжения положительными. Такая замена знака равносильна умножению левой и правой части неравенства (31.2) на минус единицу. В этом случае критерий пластичности (31.2) примет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{R_c}{R_t} \leq R_c. \quad (32)$$

Критерий прочности Мора, записанный в форме неравенства (32), можно использовать для вывода любой формы записи уравнения предельного состояния по оригинальному условию пластичности Мора – Кулона, представленному в таблице 1. Для этого неравенство (32) достаточно записать в виде уравнения предельного состояния и подставить в него выражения, связывающие пределы прочности на сжатие и растяжение с параметрами критерия Мора – Кулона, то есть сцеплением и углом внутреннего трения. Пределы прочности на сжатие и растяжение можно определить по тождественным формулам:

$$R_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}. \quad (33.1)$$

$$R_t = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}. \quad (33.2)$$

Выполнив подстановку выражений (33.1) и (33.2) в уравнение предельного состояния критерия Мора (32), получим

$$\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (34.1)$$

и $\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}.$

Каждое из уравнений (34.1) можно привести к виду уравнений предельного состояния, представленных в таблице 1. Для этого в правой части уравнений (34.1) оставим сцепление грунта, а функции угла внутреннего трения перенесем в правую часть, раскрыв скобки. В этом случае получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_1 \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} = c \quad (34.2)$$

и $\frac{\sigma_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \frac{\sigma_3}{2} \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} = c.$

В первом из уравнений (34.2) выполним группировку членов так, чтобы получить уравнения

$$\frac{\sigma_1}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_3 \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} = c \quad (34.3)$$

или $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = c.$

Уравнения (34.3) раскрывают суть приведения первого из уравнений (34.1) к виду уравнений предельного состояния критерия Мора – Кулона. В этом несложно убедиться, записав имеющееся во втором уравнении (34.3) отношение синуса к косинусу угла внутреннего трения тангенсом этого угла. В этом случае второе из уравнений (34.3) примет такой же вид, как уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона в форме записи по В.В. Соколовскому (см. первое уравнение таблицы 1 и уравнение для среды, обладающей трением и сцеплением, представленное в таблице 3).

Во втором из уравнений (34.2) тоже необходимо выполнить преобразования, но так, чтобы получить уравнение

$$\frac{\sigma_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \frac{\sigma_3}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} = c. \quad (34.4)$$

Уравнение (34.4) представляет собой одну из форм записи уравнения предельного состояния по критерию Мора – Кулона. Выражение (34.4) можно привести к виду любого другого уравнения, представленного в таблице 1.

Обсуждая сделанные нами выкладки из неравенства (32), отметим, что для вывода уравнений предельного состояния критерия Мора – Кулона (34.3) и (34.4) нами применен критерий Мора, а не уравнение предельной прямой Кулона. Здесь обратим внимание, что для специалистов дорожной отрасли стандартным выводом критерия Мора – Кулона и уравнения его предельного состояния является преобразование критерия Кулона и уравнения предельного состояния Кулона. Такой вывод нами показан на примере преобразования выражений (29.1) и (29.2) в уравнения (29.7) и (29.8). Преобразование критерия (32) приводит точно к таким же уравнениям предельной прямой (34.3) и ее аналогу (34.4), но эти преобразования не столь очевидны для дорожников. Тем не менее именно этот путь позволяет выполнить модификацию оригинального критерия Мора – Кулона, введя в него третий параметр материала. Ввод третьего параметра позволяет связать уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона с уравнением предельного состояния любого другого критерия, параметрами которого является угол внутреннего трения и/или сцепление. При этом обязательным условием модификации является то, чтобы в углах сжатия шестигранника Мора, построенном на девиаторной плоскости, связываемые критерии давали различный результат.

Для такой модификации нами разработан способ, изложенный в работе [56]. Суть этого способа можно сформулировать словами, в виде трех последовательных действий:

1. Необходимо выбрать два оригинальных условия пластичности, одним из которых является традиционный двухпараметрический критерий Мора – Кулона. Вторым критерием должно быть оригинальное условие пластичности, по которому эквивалентное напряжение больше, чем напряжение сдвига по критерию Мора – Кулона. В этом случае предельные поверхности обоих оригинальных критериев ограничивают область варьирования поверхности разрушения разрабатываемого трехпараметрического критерия Мора – Кулона. Эквивалентные напряжения обоих оригинальных критериев сверху и снизу огра-

ничивают диапазон варьирования напряжения сдвига по трехпараметрическому критерию Мора – Кулона.

2. Выводят математические зависимости, связывающие пределы прочности на сжатие и растяжение с тремя параметрами материала, разрабатываемого трехпараметрического критерия. Такими параметрами являются традиционные характеристики сопротивления сдвигу – сцепление и угол внутреннего трения, а также новый третий параметр. Диапазон варьирования третьего параметра ограничивается максимальным и минимальным значением. К этим значениям предъявляются требования. Первое требование состоит в том, чтобы при одном предельном значении третьего параметра формулы, связывающие пределы прочности с характеристиками сопротивления сдвигу трехпараметрического критерия, приводились к формулам, связывающим пределы прочности на сжатие и растяжение с параметрами одного из оригинальных критериев пластичности, ограничивающего поверхность разрушения создаваемого трехпараметрического критерия. Второе требование заключается в том, что при другом предельном значении третьего параметра выражения, связывающие пределы прочности с характеристиками сопротивления сдвигу, должны преобразовываться в зависимости пределов прочности от характеристик сопротивления сдвигу второго оригинального критерия, ограничивающего поверхность разрушения создаваемого трехпараметрического критерия.

3. Полученные формулы, отвечающие оговоренным требованиям, подставляются в критерий Мора для сжатия (32), из которого выводятся трехпараметрический критерий сопротивления сдвигу и уравнение предельного состояния.

Сформулированный нами способ рассмотрим на конкретном примере. В качестве оригинальных критериев пластичности, ограничивающих разрабатываемый трехпараметрический критерий, примем условия пластичности Мора – Кулона в форме уравнения (34.4) и третьей теории прочности, в которой сопротивление сдвигу зависит от сцепления точно так же, как в критерии Мора – Кулона для идеально связного грунта, записанному по В.В. Соколовскому и представленному в таблице 3.

Тогда получим пару уравнений предельного состояния:

$$\frac{\sigma_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - \frac{\sigma_3}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} = c; \quad (35)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c.$$

В этом случае связь пределов прочности на сжатие и растяжение с параметрами сопротивления сдвигу необходимо дать формулами:

$$R_c = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^{2d} = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d. \quad (36.1)$$

$$R_t = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{\cos\varphi}{1+\sin\varphi} \right)^{2d} = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \right)^d. \quad (36.2)$$

где d – третий параметр, характеризующий сопротивление сдвигу материала и зависящий от вертикальной упругопластической деформации при трехосном сжатии.

Анализируя тождества (36.1) и (36.2) несложно заметить, что в зависимости от величины d сопротивления сжатию и растяжению изменяются, имея диапазон варьирования, ограниченный при $d=0$ пределами прочности третьей теории $R_c=R_p=2 \cdot c$, а при $d=0,5$ пределами критерия Мора, вычисляемыми по формулам (33.1) и (33.2). Поделив зависимость (36.1) на выражение (36.2), получим отношение пределов прочности на сжатие и растяжение, используемое в критерии (32):

$$\frac{R_c}{R_t} = \frac{2 \cdot c \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d}{2 \cdot c \cdot \left(\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \right)^d} = \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d = \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^{2d}. \quad (36.3)$$

Записав критерий (32) в виде уравнения предельного состояния и подставив в него зависимости (36.1) и (36.3), получим уравнение предельного состояния трехпараметрического критерия Мора – Кулона:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^{2d} = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d; \quad (37)$$

$$\frac{\sigma_1}{2} \cdot \left(\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \right)^d - \frac{\sigma_3}{2} \cdot \left(\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \right)^d = c.$$

Анализируя второе из уравнений предельных состояний (37) убеждаемся:

1. При $d=0,5$ получаем уравнение предельного состояния оригинального двухпараметрического критерия пластичности Мора – Кулона, записанное в форме уравнения (34.4) или первого из уравнений (35).

2. При $d=0$ получаем уравнение предельного состояния оригинального однопараметрического критерия пластичности третьей теории прочности, записанное в форме уравнения таблицы 3 или второго из уравнений (35).

3. При варьировании третьего параметра d от нулевого значения до величины $d=0,5$ напряжение сдвига, записанное в левой части анализируемого уравнения, уменьшает свое значения от максимального касательного напряжения τ_{max} ($d=0$) до величины напряжения сдвига оригинального критерия Мора – Кулона τ ($d=0,5$).

При помощи левой части второго из уравнений (37) можно вычислить как напряжение сдвига от временной нагрузки, так и напряжение сдвига от собственного веса вышележащих слоев. Для этого в левую часть второго из уравнений (37) достаточно подставить главные напряжения от собственного веса вышележащих слоев, вычисляемые по формулам (19). Сделав такую подстановку, получим

$$\frac{\gamma_{cp} \cdot h}{2} \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right)^d \right] = c \quad (38)$$

Определяя из уравнений (37) и (38) напряжения сдвига от временной нагрузки и собственного веса грунта и суммируя их, вычислим полное напряжение сдвига в любой точке рассчитываемого элемента. В этом случае остается применимой формула (15), а вместо зависимостей (16) и (17) получим формулы из уравнений предельного состояния новых трехпараметрических критериев пластичности (37) и (38). Тогда расчет полного напряжения сдвига выполняется по формулам:

$$T_a = \tau_{ан} + \tau_{ав} \quad (39)$$

$$\tau_{ан} = \frac{\sigma_1}{2} \cdot \left(\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \right)^d - \frac{\sigma_3}{2} \cdot \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right)^d \quad (40)$$

$$\tau_{ав} = \frac{\gamma_{cp} \cdot h}{2} \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right)^d \right] \quad (41)$$

Критерий расчета по сопротивлению сдвигу грунта земляного полотна или слоя дорожной одежды из слабосвязных материалов можно принять в виде неравенства

$$T_a \leq \frac{k \cdot c}{K_{str}} \quad (42)$$

где k – комплексный коэффициент, учитывающий изменение сцепления грунта или слабосвязного материала, в результате воздействия каких-либо факторов (суммарного числа приложения расчетной нагрузки, конструктивных особенностей дорожной одежды).

Отметим, что комплексный коэффициент k в критерии (42) может определяться одним значением подобно тому, как это сделано в современных расчетах, так и быть функцией ряда коэффициентов, аналогично математическим представлениям А.М. Кривисского и ранее действовавших ВСН. Специфика вычисления этого коэффициента и обоснование его значений в нашей работе не рассматривается.

Предложенные нами формулы позволяют определить безопасное давление на грунтовое основание. Для этого критерий (42) нужно записать в уравнение предельного состояния. В этом уравнении полное напряжение сдвига вычисляется суммой двух составляющих по формуле (39), каждая из которых рассчитывается по выражениям (40) и (41).

Выполнив перечисленные действия, получим

$$\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \sigma_3 \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d + \gamma_{cp} \cdot h \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right] = 2 \cdot \frac{k \cdot c}{K_{str}}. \quad (43)$$

В уравнении (43) общий множитель 2 записан в правой части, то есть из формул (40) и (41) делитель 2 перенесен за знак равенства в правую часть уравнения предельного состояния.

В настоящее время известно несколько подходов к определению главных напряжений от нагрузки, распределенной по круглой площадке. К таким решениям относят формулы, полученные методами механики сплошной [23, 57, 58, 59] и зернистой [60, 61, 62] среды, а также инженерными методами. Инженерные методы основаны либо на анализе физических моделей напряженного состояния грунтовой и зернистой среды [63, 64], либо на математическом моделировании результатов лотковых экспериментов [65, 66, 67, 68]. Общей характерной особенностью всех формул, предназначенных для расчета главных напряжений, является прямая пропорциональность максимального и минимального главных напряжений от давления, передаваемого круглой площадкой. Поэтому главные напряжения можно представить произведением давления и коэффициента затухания максимального или минимального главного напряжения по глубине полупространства или слоя конечной толщины. В связи с этим справедливыми будут формулы:

$$\sigma_1 = p \cdot K_1; \quad \sigma_3 = p \cdot K_3, \quad (44)$$

где K_1 и K_3 – коэффициенты затухания максимального σ_1 и минимального σ_3 главных напряжений, являющимися функцией координат в формулах механики сплошной среды и функцией параметров материала и глубины в решениях механики зернистой среды и инженерных моделей.

Подставив формулы (44) в уравнение (43), получим

$$p \cdot K_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - p \cdot K_3 \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d = 2 \cdot \frac{k \cdot c}{K_{str}} - \gamma_{cp} \cdot h \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right]. \quad (45)$$

Решив уравнение (45) относительно давления p , получим формулу

$$p = \frac{\frac{2 \cdot k \cdot c}{K_{str}} - \gamma_{cp} \cdot h \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right]}{\left[K_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - K_3 \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right]}. \quad (46)$$

Формулу (46) можно использовать для определения безопасного давления при любых значениях параметров материала трехпараметрического критерия пластичности, но при значениях коэффициентов затухания главных напряжений K_1 и K_3 , соответствующих значениям, принимаемыми этими функциями в наиболее опасной точке. Таким образом, для вычисления безопасного давления необходимо определить наиболее опасную точку, принадлежащую оси симметрии нагрузки и рассчитать в этой точке значения коэффициентов K_1 и K_3 . Из анализа формулы (46) следует, что наиболее опасной точке соответствует точка, в которой знаменатель выражения (46) принимает максимальное значение, а давление p , наоборот, приобретает наименьшее из всех возможных значений.

Таким образом, безопасное давление определяется по формуле

$$p_s = SP = \frac{\frac{2 \cdot k \cdot c}{K_{str}} - \gamma_{cp} \cdot Z_{dp} \cdot \left[\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \xi \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right]}{\left[K_{1dp} \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - K_{3dp} \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \right]}, \quad (47)$$

где Z_{dp} – глубина расположения наиболее опасной точки по оси симметрии нагрузки, м; K_{1dp} и K_{3dp} – значения функций коэффициентов затухания K_1 и K_3 максимального σ_1 и минимального σ_3 главных напряжений в наиболее опасной точке.

Из анализа формулы (47) следует, что при величине третьего параметра d , равной 0,5, по этой зависимости вычисляется первая критическая нагрузка. В этом случае формула (47) примет вид

$$p_{lim} = \frac{\frac{2 \cdot k \cdot c}{K_{str}} - \gamma_{cp} \cdot Z_{dp} \cdot \left(\sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \xi \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right)}{K_{1dp} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - K_{3dp} \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}}. \quad (48)$$

Из анализа формул (47) и (48) следует, что при $d < 0,5$ справедливо неравенство $p_s < p_{lim}$. Таким образом, чем меньше величина третьего параметра d , тем меньше безопасное давление p_s и меньше соответствующая этому давлению осадка полупространства или слоя конечной толщины. Рассматривая рисунок 1, отметим, что при $d=0,5$, определяемое по формуле (47), безопасное давление равно первой критической нагрузке. С уменьшением величины параметра d величина безопасного давления уменьшается, а его величина на рисунке 1, удаляясь от первой критической нагрузки, приближается к структурной прочности грунта. В этом случае при любой величине безопасного давления сохраняется линейная зависимость осадки от давления. Поэтому сделанное нами применение метода линейно деформируемой среды для вывода формулы (47) и зависимости (48) совершенно справедливо.

Разработанный нами способ модификации критерия Мора – Кулона и сделанные в соответствии с этим методом выкладки (35)–(38) применены А.Л. Калининым для создания другого трехпараметрического критерия. В критерии пластичности, предложенном А.Л. Калининым, в качестве условий пластичности, ограничивающих диапазон варьирования напряжения сдвига трехпараметрического критерия, приняты оригинальные критерии Мора и Арнольда. Критерий Мора принят в форме (32), вследствие чего наименьшее значение напряжения сдвига такое же, как в нашем критерии (37), (40). Критерий Г. Арнольда эмпирический, напряжения сдвига в этом критерии больше напряжений сдвига критерия Мора, но меньше максимального касательного напряжения третьей теории прочности. Поэтому в трехпараметрическом условии пластичности, полученном А.Л. Калининым, диапазон варьирования напряжения сдвига меньше, чем в демонстрируемом нами критерии (47). Тем не менее оба трехпараметрических критерия можно использовать в расчете по сопротивлению сдвигу, основанному либо на вычислении полного напряжения сдвига и его сравнении с предельной величиной, либо на вычислении безопасного давления с последующим его сравнением с давлением, передаваемым вышележащими слоями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный анализ нормативных методов расчета по сопротивлению сдвигу позволяет утверждать, что современные документы ОДН 218.046-01, ПНСТ 265-2018 и ПНСТ 542-2021 содержат ошибки и противоречат основам механики грунтов.

Во-первых, любой расчет по сопротивлению сдвигу, в основе которого лежит оригинальное двухпараметрическое условие пластичности Мора – Кулона, не гарантирует отсутствия накопления остаточных деформаций. Это утверждение подтверждено общепринятыми представлениями о фазах (стадиях) работы грунтовых оснований, представленных на рисунке 1. Согласно этим представлениям давление, воспринимаемое грунтовым основанием, при котором в наиболее опасной точке возникает предельное состояние по критерию Мора – Кулона, численно рав-

но первой критической нагрузке. Первая критическая нагрузка ограничивает первую фазу деформирования, которую называют фазой уплотнения. В этой фазе работы грунтового основания осадка связана с давлением линейной зависимостью, но осадка является упруго-пластической, состоящей из двух составляющих – упругой и остаточной. Поэтому расчет по условию пластичности Мора – Кулона не может обеспечить работу грунта земляного полотна и слоев из слабосвязных материалов в упругой стадии. Такой расчет лишь гарантирует отсутствие нелинейной связи осадки с давлением, при которой остаточная деформация существенно превышает обратимую составляющую осадки.

Во-вторых, недопустимым является использование разных значений углов внутреннего трения при расчете двух составляющих полного напряжения сдвигу, а именно активных напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса вышележащих слоев. В этом случае касательные и нормальные составляющие активного напряжения сдвига от временной нагрузки действуют вдоль и перпендикулярно одной площадке скольжения, повернутой к главным осям под углом $\alpha = 45^\circ \pm \phi_{N(N>1)}/2$. Составляющие напряжения сдвига от собственного веса вышележащих слоев приложены к другой площадке, повернутой к главным осям под иным углом $\alpha = 45^\circ \pm \phi_{ct(N=1)}/2$. При таком подходе к расчету активных напряжений сдвига от временной нагрузки и собственного веса вышележащих слоев принцип независимости действия сил становится неприменимым. Это значит, что активные напряжения сдвига, или их касательные, и нормальные составляющие, возникающие от разных сил, суммировать или сравнивать нельзя. Это замечание констатирует наличие в действующих нормативных расчетах грубой ошибки, требующей исправления.

Оценивая замечания по основным ошибкам, допущенным в современных нормативных методах расчета по сопротивлению сдвигу, отметим, что необходимо их исправление. Для этого нужно либо вернуть методику и формулы научной группы А.М. Кривисского, либо разработать новый модифицированный расчет.

2. Анализ методов расчета дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения показал, что эту методику необходимо дополнить расчетом по сопротивлению сдвигу. Данный вывод связан с применением в ПНСТ 371-2019 линейных

зависимостей деформаций от давлений. Такие линейные зависимости положены в основу вычисления общего модуля деформации двухслойной системы и накапливаемой остаточной деформации, являющейся одной из составляющих при расчете глубины колеи. Из рисунка 1, представляющего собой основы учения о стадиях деформирования грунтовых оснований, следует, что первая критическая нагрузка ограничивает применение линейной зависимости осадки от давления. Так как первой критической нагрузке соответствует давление, при котором в наиболее опасной точке грунтового основания возникает предельное состояние по оригинальному двухпараметрическому критерию пластичности Мора – Кулона, то расчет по сопротивлению сдвигу гарантирует правильность применения линейных зависимостей деформаций от давлений. Для этого можно воспользоваться методикой научной группы А.М. Кривисского.

3. Представленный в работе модифицированный трехпараметрический критерий Мора – Кулона позволяет выполнять расчет при более высоких, по сравнению с классическим двухпараметрическим условием пластичности, полных напряжениях сдвига. В модифицированном условии пластичности напряжение сдвига возрастает при уменьшении величины третьего параметра d . При $d=0$ нормальная составляющая эквивалентного напряжения (напряжения сдвига) в этом критерии становится равной нулю, а касательное напряжение достигает максимально возможного значения, определяемого полуразностью максимального и минимального главных напряжений. Поэтому максимальная величина напряжения сдвига в трехпараметрическом критерии ограничена эквивалентным напряжением третьей теории прочности, а именно максимальным касательным напряжением. С увеличением значения третьего параметра d касательное напряжение уменьшается, а нормальное, наоборот, возрастает. Вследствие этого при увеличении величины третьего параметра d эквивалентное напряжение модифицированного трехпараметрического критерия уменьшается, принимая минимальное значение напряжения сдвига при $d=0,5$. Наименьшее значение напряжения сдвигу трехпараметрического критерия соответствует величине эквивалентного напряжения классического критерия Мора – Кулона.

4. Представленный нами расчет безопасного давления можно применить в качестве

расчета по сопротивлению сдвигу, сравнивая эту величину с давлением, воспринимаемым земляным полотном или слоем дорожной одежды из слабосвязного материала. В основе расчета безопасного давления лежит модифицированный трехпараметрический критерий пластичности. При прочих равных условиях наибольшая величина безопасного давления получается при величине третьего параметра $d=0,5$. В этом случае значение безопасного давления соответствует первой критической нагрузке. При уменьшении величины третьего параметра d значение безопасного давления уменьшается, принимая наименьшее значение при $d=0$. В этом случае величина безопасного давления соответствует предельному давлению по третьей теории прочности. Таким образом, уменьшение параметра d приводит к смещению безопасного давления от первой критической нагрузки в сторону структурной прочности (см. рисунок 1). Отсюда следует, что чем меньше значение параметра d , тем меньше безопасное давление и соответствующая этому давлению упругопластическая осадка.

5. Предлагаемые расчеты по сопротивлению сдвигу, основанные на вычислении напряжений сдвига и безопасных давлений, получены методом линейно деформируемой среды. Суть метода состоит в том, что напряжение сдвига вычисляется непосредственно из критерия пластичности как эквивалентное напряжение по этому критерию. Формула для вычисления безопасного давления выводится из уравнения предельного состояния по предложенному трехпараметрическому критерию. Возможность применения метода линейно деформируемой среды к обоим вариантам расчета подтверждена тем, что наибольшая величина безопасного давления, вычисляемая по данному методу, соответствует первой критической нагрузке, при которой происходит зарождение неустойчивой области в наиболее опасной точке основания. В этом случае в применении теории предельного равновесия грунта с составлением канонической системы дифференциальных уравнений нет необходимости. Тем не менее отметим, что предлагаемое трехпараметрическое условие пластичности можно использовать в теории предельного равновесия. Данный вывод связан с тем, что в системе уравнений теории предельного равновесия критерий пластичности применяется в качестве физического уравнения, дополня-

ющего математические дифференциальные уравнения совместности деформаций и напряжений.

6. В основе обоих расчетов по напряжениям сдвига и безопасным давлениям лежит одно и то же трехпараметрическое условие пластичности. Поэтому при прочих равных условиях оба расчета будут приводить к одинаковой конструкции дорожной одежды. В связи с этим достаточно пользоваться только одним из двух расчетов. Тем не менее расчет по безопасному давлению по сравнению с расчетом по напряжениям сдвига имеет важное преимущество, которое состоит в возможности экспериментального определения величины безопасного давления. Измерить напряжение сдвига на расчетной площадке, проведенной через наиболее опасную точку, невозможно. Это объясняется тем, что эквивалентное напряжение сдвига в критерии Мора – Кулона состоит из двух напряжений: касательного, действующего вдоль площадки скольжения и нормального, направленного перпендикулярно этой площадке. Значит, для экспериментального подтверждения величины напряжения сдвига необходимо измерять два напряжения – касательное и нормальное, действующие на одну и ту же площадку, проведенную через одну и ту же точку. Это в принципе невозможно.

7. В нашей работе показаны ошибки современных нормативных методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу, на менее значимых недостатках мы внимание не заостряли. Тем не менее продемонстрированных нами противоречий с положениями механики грунтов достаточно для утверждения того, что на протяжении двух десятилетий специалисты-практики используют ошибочные методы в проектах строительства и реконструкции автомобильных дорог. Описанные нами ошибки расчета по сопротивлению сдвигу являются лишь частью большой проблемы расчета дорожных одежд нежесткого типа по критериям прочности. Эта проблема связана с недостатками и ошибками, лежащими в основе двух других критериев расчета, а именно в расчетах дорожной одежды по упругому прогибу и сопротивлению монолитных слоев усталостному растяжению от изгиба. Раскрытие сути таких недостатков и ошибок изложим в последующих публикациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements*. London. 1972. 1: 161-174.
2. Leng J. Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load. *PhD thesis*, North Carolina State University, Raleigh, The USA. 2002.
3. Cheung L.W. Laboratory assessment of pavement foundation materials. *PhD thesis*, University of Nottingham, The United Kingdom. 1994.
4. Sweere G.T.H. Unbound granular bases of roads. *PhD thesis*, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1990.
5. Wolff H., Visser A. Incorporating elastoplasticity in granular layer pavement design. *Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport*. 1994. Vol. 105. Pp. 259 – 272.
6. Francken L., Clauwaert C. Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures. *Proceedings of the 6-th International Conference on Asphalt Pavements*. Ann Arbor, Michigan. 1987. Pp. 130-144.
7. Theyse H.L. The development of mechanistic-empirical permanent deformation design models for unbound pavement materials from laboratory accelerated pavement. *Proceedings of the 5-th International symposium on unbound aggregates in road*. Nottingham. 2000. P. 285 – 293.
8. Tseng K. H., Lytton R. L. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials, in *Implication of Aggregates in the Design, Construction and Performance of Flexible Pavements*, ASTM International, 1989. Vol. STP 1016. Pp 154-172. DOI: 10.1520/STP24562S
9. Veverka V. Raming van de Spoordiepte bij Wegen met een Bitumineuze Verharding. *De Wegentechniek*. 1979. Vol. 24. N3. Pp. 25-45.
10. Khedr S.A. Deformation characteristics of granular base course in flexible pavements. *Transportation Research Record*. 1985. N1043. Pp. 131-138.
11. Hicks R.G., Monismith C.L. Factors influencing the resilient response of granular materials. *Highway Research Record*. 1971. Vol. 345. Pp. 15-31.
12. Monismith, C.L., Ogawa, N., Freeme, C.R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. *Transportation Research Record*. 1975. Vol. 537. Pp. 1-17.
13. Shackel, B. Repeated Loading of Soils - A Review. *Australian Road Research*. 1973. Vol. 5. N3. Pp. 22-49.
14. Uzan J. Characterization of granular material. *Transportation Research Record*. 1985. N1022. Pp. 52–59.
15. Uzan J., et al. Development and Validation of Realistic Pavement Response Models. In *Proceedings, 7th International Conference on Asphalt Pavements*, Nottingham, U.K. 1992. Vol. 1. 07023.
16. Seyhan U. Characterization of anisotropic granular layer behavior in flexible pavement. *PhD thesis*, of the University of Illinois at Urbana Champaign. 2002.
17. Seyhan U., Tutumluer E. Anisotropic Modular Ratios As Unbound Aggregate Performance Indicators. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002. ASCE, Vol. 14. N5, Pp. 409-416. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(409)
18. Boyce J.R. The behavior of a Granular Material Under Repeated Loading. *PhD thesis*, Department of Civil Engineering, University of Nottingham. 1976.
19. Boyce J.R. A non-linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading. *Proc. Int. Symp. Soils under Cyclic & Transient Loading*, Swansea. 1980. Pp. 285-294.
20. Jouve, P., et al. Rational model for the flexible pavement deformations. *Proc., 6th Int. Conf. on Struct. Des. of Asphalt Pavements*. 1987. Vol. 1. Pp 50–64.
21. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. Эмпирические условия пластичности в расчетах земляного полотна по сдвигу // *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2019. № 10(85). С. 7–20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1
22. Benz T., Wehnert M., Vermeer P.A. A Lode Angle Dependent Formulation of the Hardening Soil Model. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)* 1-6 October, 2008, Goa, India. Pp. 653–660.
23. Craig R.F. *Soil Mechanics*. Seventh edition. Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York, 2004. – 447 p. doi: 10.4324/9780203494103.
24. Rachkov, D.V., Pronozin, Ya.A., Chikishev, V.M. Qualified method of layer-by-layer summation to define the settlement of foundation. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 72(4). Pp. 36–45. doi: 10.18720/MCE.72.5
25. Барвашов В. А., Болдырев Г. Г., Уткин М. М. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований // *Геотехника*. 2016. №1. С. 12–29.
26. Prandtl, L. Uber die Eindringungs-festigkeit (Harte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1921. Vol. 1(1). Pp. 15–20.
27. Reissner, H. Zum Erddruck problem (Concerning the earth-pressure problem). *Proceedings of the First International Congress on Applied Mechanics*. Ed. C.B. Biezeno and J.M. Burgers, Delft. 1926. Pp. 295-311.
28. Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. 1943. John Wiley & Sons, New York.
29. Meyerhof, G.G. The ultimate bearing capacity of foundations. *Journal of Geotechnique*. 1951. Vol. 2(4). Pp. 301-332.
30. Loukidis, D., Salgado, R. Bearing capacity of strip and circular footings in sand using nite elements. *Computers & Geotechnics*. 2009. Vol. 36(6). Pp. 871-879. DOI:10.1016/j.compgeo.2009.01.012
31. Karaulov A.M., Korolev K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Freestanding Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and*

Foundation Engineering. 4(54), 211-215 (2017). doi: 10.1007/s11204-017-9460-6

32. Korolev K.V. Intermediate Bearing Capacity of Saturated Bed of Strip Foundation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1(51), 1-8 (2014). DOI:10.1007/s11204-014-9246-z

33. Korolev K.V. Terminal (Maximum) Bearing Capacity of the Saturated Bed of a Strip Foundation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013. Vol. 4(50). Pp. 143-149. DOI:10.1007/s11204-013-9226-8

34. Hambleton, J.P., Drescher, A. Modeling test rolling on cohesive subgrades. *Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials – Loizos, Scarpas & Al-Qadi* (eds) Taylor & Francis Group, London. 2007. Pp. 359-368.

35. Hambleton, J.P., Drescher, A. Modeling wheel-induced rutting in soils: Indentation. *Terramechanics*. 2008. Vol. 45. Pp. 201–211.

36. Karafiath L.L., Nowatzki E.A. Soil Mechanics for Off-Road Vehicle Engineering. Clausthal: Trans Tech. 1978. 515 p.

37. Khasanov A., Khasanov Z. Alternative concepts of the theory of strength of sand soil. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul 2017. 2017. P. 2163–2166.

38. Tatsuoka et al. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand. *Soils and Foundations*, 1990. Vol. 30, pp. 35-54. doi: 10.3208/sandf1972.30.35

39. Vardoulakis I. Localization in geomechanics. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005–2006. Pp. 3663–3668. doi:10.3233/978-1-61499-656-9-3663

40. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique*. 1970. Vol. 20(2). Pp. 129-170.

41. Arthur J.R. et al. Plastic deformation and failure of granular media. *Geotechnique*, 1977. 27. Pp. 53-74.

42. Muhlhaus H. et al. The influence of non-coaxiality on shear banding in viscous-plastic materials. *Granular Matter*. 2010 Vol. 12(3), pp 229–238. doi: 10.1007/s10035-010-0176-9

43. Bolton M.D., The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 1986, Vol. 36(1). Pp. 65–78.

44. Schanz T., Vermeer P.A. Angles of friction and dilatancy of sand. *Geotechnique*, 1996, 46(1): 145-151. doi: 10.1680/geot.1996.46.1.145

45. Cinioglu O. et al. Variation of Friction Angle and Dilatancy For Anisotropic Cohesionless Soils. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013. Pp. 895–898.

46. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part I: The frictional state theory. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2016, Vol. 38(4), Pp. 51–57. doi: 10.1515/sgem-2016-0030

47. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part II: Experimental validation for triaxial tests. *Studia*

Geotechnica et Mechanica, 2016, Vol. 38(4), Pp. 59–65. doi: 10.1515/sgem-2016-0031

48. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part III: Experimental validation for the biaxial condition. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2017, Vol. 39(1), Pp/ 73–80. doi:10.1515/sgem-2017-0007

49. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313, № 1. С. 69–74.

50. Орехов В.В., Орехов М.В. Использование модели упрочняющегося грунта для описания поведения песка различной плотности при нагружении // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 91–97.

51. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. 2018. Vol. 216: 01011.

52. Строкова, А.Л. Учет переуплотнения грунтов в расчетах оседания земной поверхности при сооружении туннелей // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 1. С. 147–151.

53. Brooker E.W., Ireland H.O. Earth pressures at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal*. 1965. Vol. 2, No. 1. Pp. 1-15.

54. Jaky J. The Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*. 1944. PP. 355 - 358.

55. Michalowski R.L. Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005. Vol. 131(11). Pp.1429–1433.

56. Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора // Инженерно строительный журнал. 2015. № 7. С. 4–17. DOI: 10.5862/MCE.59.1

57. Ahlvin, R.G., Ulery H.H. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Load on a Homogeneous Half Space, *Highway Research Record*, 1962. Bull. 342, pp. 1–13,

58. Foster, C.R., Ahlvin, R.G. Stresses and deflections induced by a uniform circular load. *Proc. Highway Research Board*. 1954. Vol. 33. P. 236 – 246.

59. Werkmeister, S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. 189 p.

60. Кандауров, И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И.И. Кандауров. – М. : Стройиздат, 1966. – 314 с.

61. Harr, M.E. *Mechanics of Particulate Media*. McGraw-Hill, New York, NY. 1977.

62. Harr, M.E. *Foundations of Theoretical Soil Mechanics*. McGraw Hill Book Company, New York, 1966.

63. Aleksandrov, A.S., Dolgih, G.V., Smirnov, A.V. Improvement of Calculation of Stresses in the Earth Bed and Layers of Road Clothes from Granulated Materials. Part 1. Analysis of Decisions and a New Method. IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering, 2018, 463(2), 022022. DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022022

64. Aleksandrov A.S., Smirnov A.V. and Semenova T.V. 2019 Stress Investigation in Pavement

Layers and a New Calculation Model. *Materials Science Forum*. Vol. 945. pp 813-820. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.813

65. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, University of Canterbury. 2009. 392 p.

66. Gonzalez, C.R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports. *Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2006)* "Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice" 21-23 June 2006, Mayagüez, Puerto Rico.

67. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2), pp. 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7

68. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021, 58(1). DOI:10.1007/s11204-021-09700-8

REFERENCES

1. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements*. London. 1972. 1: 161-174.

2. Leng J. Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load. *PhD thesis*, North Carolina State University, Raleigh, The USA. 2002.

3. Cheung L.W. Laboratory assessment of pavement foundation materials. *PhD thesis*, University of Nottingham, The United Kingdom. 1994.

4. Sweere G.T.H. Unbound granular bases of roads. *PhD thesis*, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1990.

5. Wolff H., Visser A. Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design. *Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport*. 1994. 105: 259 – 272.

6. Francken L., Clauwaert C. Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures. *Proceedings of the 6-th International Conference on Asphalt Pavements*. Ann Arbor, Michigan. 1987. 130-144.

7. Theyse H.L. The development of mechanistic-empirical permanent deformation design models for unbound pavement materials from laboratory accelerated pavement. *Proceedings of the 5-th International symposium on unbound aggregates in road*. Nottingham. 2000. 285 – 293.

8. Tseng K. H., Lytton R. L. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials, in *Implication of Aggregates in the Design, Construction and Performance of Flexible Pavements*, ASTM International, 1989. 1016: 154-172. DOI: 10.1520/STP24562S

9. Veverka V. Raming van de Spoordiepte bij Wegen met een Bitumineuze Verharding. *De Wegen-techniek*. 1979. 24. 3: 25-45.

10. Khedr S.A. Deformation characteristics of granular base course in flexible pavements. *Transportation Research Record*. 1985. 1043: 131-138.

11. Hicks R.G., Monismith C.L. Factors influencing the resilient response of granular materials. *Highway Research Record*. 1971. 345: 15-31.

12. Monismith, C.L., Ogawa, N., Freeme, C.R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. *Transportation Research Record*. 1975. 537: 1-17.

13. Shackel, B. Repeated Loading of Soils - A Review. *Australian Road Research*. 1973. 5. 3: 22-49.

14. Uzan J. Characterization of granular material. *Transportation Research Record*. 1985. 1022: 52–59.

15. Uzan J., et al. Development and Validation of Realistic Pavement Response Models. *In Proceedings, 7th International Conference on Asphalt Pavements*, Nottingham, U.K. 1992. 1. 07023.

16. Seyhan U. Characterization of anisotropic granular layer behavior in flexible pavement. *PhD thesis*, of the University of Illinois at Urbana Champaign. 2002.

17. Seyhan U., Tutumluer E. Anisotropic Modular Ratios As Unbound Aggregate Performance Indicators. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002. ASCE, 14. 5: 409-416. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(409)

18. Boyce J.R. The behavior of a Granular Material Under Repeated Loading. PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham. 1976.

19. Boyce J.R. A non-linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading. *Proc. Int. Symp. Soils under Cyclic & Transient Loading*, Swansea. 1980. 285-294.

20. Jouve, P., et al. Rational model for the flexible pavement deformations. *Proc., 6th Int. Conf. on Struct. Des. of Asphalt Pavements*. 1987. 1: 50–64.

21. Aleksandrov A., Dolgikh G., Kalinin A. Jempiricheskie uslovija plastichnosti v raschetah zemljanogo polotna po sdvigu [Empirical conditions of plasticity in calculations of the subgrade by shift]. *Construction of unique buildings and structures*. 2019. 10(85): 7-20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1 (in Russian)

22. Benz T., Wehnert M., Vermeer P.A. A Lode Angle Dependent Formulation of the Hardening Soil Model. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)* 1-6 October, 2008, Goa, India. 653–660.

23. Craig R.F. *Soil Mechanics*. Seventh edition. Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York, 2004. 447 doi: 10.4324/9780203494103.

24. Rachkov, D.V., Pronozin, Ya.A., Chikishev, V.M. Qualified method of layer-by-layer summation to define the settlement of foundation. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 72(4): 36–45. doi: 10.18720/MCE.72.5

25. Barvashov V.A., Boldyrev G.G., Utkin M.M. Calculation of settlements and tilts of engineering

structures taking into account uncertainty of foundation soil properties. *Geotechnics*, 2016, 1: 4-21.

26. Prandtl, L. Uber die Eindringungs-festigkeit (Harte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1921. 1(1): 15–20.

27. Reissner, H. Zum Erddruck problem (Concerning the earth-pressure problem). *Proceedings of the First International Congress on Applied Mechanics*. Ed. C.B. Biezeno and J.M. Burgers, Delft. 1926. Pp. 295-311.

28. Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. 1943. John Wiley & Sons, New York.

29. Meyerhof, G.G. The ultimate bearing capacity of foundations. *Journal of Geotechnique*. 1951. 2(4): 301-332.

30. Loukidis, D., Salgado, R. Bearing capacity of strip and circular footings in sand using finite elements. *Computers & Geotechnics*. 2009. 36(6): 871-879. DOI:10.1016/j.compgeo.2009.01.012

31. Karaulov A.M., Korolev K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Free-standing Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017 4(54), 211-215. doi: 10.1007/s11204-017-9460-6

32. Korolev K.V. Intermediate Bearing Capacity of Saturated Bed of Strip Foundation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014 1(51): 1-8. DOI:10.1007/s11204-014-9246-z

33. Korolev K.V. Terminal (Maximum) Bearing Capacity of the Saturated Bed of a Strip Foundation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 4(50), 143-149 (2013). DOI:10.1007/s11204-013-9226-8

34. Hambleton, J.P., Drescher, A. Modeling test rolling on cohesive subgrades. *Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials – Loizos, Scarpas & Al-Qadi* (eds) Taylor & Francis Group, London. 2007: 359-368.

35. Hambleton, J.P., Drescher, A. Modeling wheel-induced rutting in soils: Indentation. *Terramechanics*. 2008. 45: 201–211.

36. Karafiath L.L., Nowatzki E.A. *Soil Mechanics for Off-Road Vehicle Engineering*. Clausthal: Trans Tech. 1978. 515

37. Khasanov A., Khasanov Z. Alternative concepts of the theory of strength of sand soil. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul 2017. 2017. 2163–2166.

38. Tatsuoka et al. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand. *Soils and Foundations*, 1990. 30: 35-54. doi: 10.3208/sandf1972.30.35

39. Vardoulakis I. Localization in geomechanics. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005–2006. 3663–3668. doi:10.3233/978-1-61499-656-9-3663

40. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique*. 1970. 20(2): 129-170.

41. Arthur J.R. et al. Plastic deformation and failure of granular media. *Geotechnique*, 1977. 27: 53-74.

42. Muhlhaus H. et al. The influence of non-coaxiality on shear banding in viscous-plastic materials. *Granular Matter*. 2010 12(3):229–238. doi: 10.1007/s10035-010-0176-9

43. Bolton M.D., The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 1986, 36(1): 65–78.

44. Schanz T., Vermeer P.A. Angles of friction and dilatancy of sand. *Geotechnique*, 1996, 46(1): 145-151. doi: 10.1680/geot.1996.46.1.145

45. Cinicioglu O. et al. Variation of Friction Angle and Dilatancy For Anisotropic Cohesionless Soils. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013: 895–898.

46. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part I: The frictional state theory. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2016, 38(4): 51–57. doi: 10.1515/sgem-2016-0030

47. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part II: Experimental validation for triaxial tests. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2016, 38(4): 59–65. doi: 10.1515/sgem-2016-0031

48. Szypcio Z. Stress-dilatancy for soils. Part III: Experimental validation for the biaxial condition. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2017, 39(1): 73–80. doi:10.1515/sgem-2017-0007

49. Strokova L.A. Determination of the Parameters for the Numerical Simulation of the Behavior of Soils. *News of Tomsk Polytechnic University*. 2008, 313(1): 69-74.

50. Orekhov V.V., Orekhov M.V. Using Hardening Soil Model for Describing the Behavior of Varied Density Sand under the Load. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2014, 2: 91-97.

51. Churilin, V., Efimenko, S., Matvienko, O., et al. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. 2018. 216: 01011.

52. Strokova L.A. Uchet pereuplotneniya gruntov v raschetah osedaniya zemnoj poverhnosti pri sooruzhenii tunnelej The effect of over consolidation ratio of soils for design a surface settlements due to tunneling. *News of Tomsk Polytechnic University*. 2010, 316(2): 35-37. (in Russian)

53. Brooker E.W., Ireland H.O. Earth pressures at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal*. 1965. 2 1: 1-15.

54. Jaky J. The Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*. 1944. PP. 355 - 358.

55. Michalowski R.L. Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005. Vol. 131(11). Pp.1429–1433

56. Aleksandrov, A.S., Kalinin, A.L. Sovershenstvovanie rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniju sdvigu [Improvement of shear strength design of a road structure]. Part 1. Deformations in the Mohr – Coulomb plasticity condition. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. 59(7): 4–17.. DOI: 10.5862/MCE.59.1. (in Russian)

57. Ahlvin, R.G., Ulery H.H. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Load on a Ho-

mogeneous Half Space, *Highway Research Record*, 1962. 342: 1–13,

58. Foster, C.R., Ahlvin, R.G. Stresses and deflections induced by a uniform circular load. *Proc. Highway Research Board*. 1954. 33: 236 – 246.

59. Werkmeister, S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. 189 p.

60. Kandaurov, I.I. Mechanics of granular media and its application in construction. - M.: Stroyizdat, 1966, 314 p.

61. Harr, M.E. Mechanics of Particulate Media. McGraw-Hill, New York, NY. 1977.

62. Harr, M.E. Foundations of Theoretical Soil Mechanics. McGraw Hill Book Company, New York, 1966.

63. Aleksandrov, A.S., Dolgih, G.V., Smirnov, A.V. Improvement of Calculation of Stresses in the Earth Bed and Layers of Road Clothes from Granulated Materials. Part 1. Analysis of Decisions and a *New Method*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 463(2), 022022. DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022022

64. Aleksandrov A S, Smirnov A V and Semenova T V 2019 Stress Investigation in Pavement

65. Layers and a New Calculation Model. *Materials Science Forum*. 945: 813-820. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.813

66. Gonzalez, A. An experimental study of the deformational and performance characteristics of foamed bitumen stabilised pavements. PhD thesis, University of Canterbury. 2009. 392 p.

67. Gonzalez, C.R. Implementation of a New Flexible Pavement Design *Procedure for U.S. Military Airports. Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2006)* "Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice" 21-23 June 2006, Mayagüez, Puerto Rico.

68. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2): 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7(in Russian)

69. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021, 58(1). DOI:10.1007/s11204-021-09700-8 (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandrov A.S. – PhD, Ass. Professor, Department of Road Construction and Operation.

Научная статья
УДК 625.7/8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОЩЕБЕНОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ СЖАТИИ

А.С. Пролыгин, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин, Н.П. Александрова
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>
dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>
<https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>
nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является математическое моделирование зависимости секущего модуля деформации от влажности грунта и содержания щебня в грунтощебеночном образце на при одноосном сжатии. Необходимость построения такой математической модели необходима для введения поправочных коэффициентов к значениям штамповых модулей деформации грунтощебеночного слоя, вычисленных по данным испытаний, поставленных при других влажностях грунта, например, при испытаниях в лотке или на дорогах в нерасчетный период года.

Материалы и методы. Для выполнения испытаний при помощи большого прибора стандартного уплотнения изготовлены цилиндрические образцы высотой 20 см и диаметром 10 см. В образцах варьировалось содержание щебня смеси фракций 5–10 и 10–20 мм. Приведены методики насыщения образцов водой и их испытания одноосным сжатием. Изложены правила обработки результатов эксперимента, к которым относится корректировка начальной части графической зависимости деформации от давления и статистическая обработка результатов. Выполнен анализ методов вычисления модуля деформации, которые классифицированы на три вида: секущий модуль, касательный модуль и кусочно-линейный модуль. На основе этого анализа обоснован способ вычисления модуля деформации грунтощебеночного образца при одноосном сжатии.

Результаты. Приведены результаты экспериментального определения деформационных характеристик грунтощебеночных образцов при одноосном сжатии. Получена математическая модель зависимости модуля деформации грунтощебеночного образца от влажности грунта и содержания щебня, применяемых в грунтово-щебеночной смеси.

Обсуждение и заключение. Даны рекомендации по применению результатов исследования для разработки альбома типовых конструкций дорожных одежд низшего типа в районах Омской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дороги с низкой интенсивностью движения, грунтощебеночный материал, модуль деформации

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 04.10.2021; принята к публикации 31.10.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Пролыгин А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л., Александрова Н.П. Влияние влажности грунта на деформационные свойства грунтощебеночных образцов при сжатии // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 614-632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

© Пролыгин А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л., Александрова Н.П., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF SOIL-CRUSHED STONE SAMPLES DURING COMPRESSION

Aleksandr S. Prolygin, Gennadii V. Dolgikh, Aleksandr L. Kalinin, Natalia P. Alexandrova

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>

dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>

<https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>

nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is to determine the dependence of the influence of soil moisture and the content of crushed stone in a soil-crushed stone sample on the secant modulus of deformation under uniaxial compression. The need for such a mathematical model is necessary in order to introduce correction factors to the values of the stamped deformation moduli of the gravel layer calculated from test data delivered at other soil moisture conditions, e.g. for flume or road tests during a non-calculated period of the year.

Materials and methods. Cylindrical samples with a height of 20 cm and a diameter of 10 cm were made to perform tests using a large standard sealing device. The content of crushed stone of a mixture of fractions of 5-10 and 10-20 mm varied in the samples. The methods of saturation of samples with water and their testing by uniaxial compression are given. The rules for processing the experimental results are described, which include: correction of the initial part of the graphical dependence of deformation from pressure and statistical processing of the results. The analysis of methods for calculating the deformation modulus, which are classified into three types, is performed: secant module, tangent module and piecewise linear module. Based on this analysis, a method for calculating the deformation modulus of a soil-crushed stone sample under uniaxial compression is justified.

Results. The results of experimental determination of the deformation characteristics of soil-crushed stone samples under uniaxial compression are presented. A mathematical model of the dependence of the deformation modulus of a soil-crushed stone sample from the soil moisture and the content of crushed stone used in the soil-crushed stone mixture is obtained.

Discussion and conclusions. Recommendations are given on the application of the research results for the development of an album of standard constructions of road pavement of the lowest type in the districts of the Omsk region.

KEYWORDS: roads with low traffic intensity, soil-crushed stone material, modulus of deformation

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 04.10.2021; accepted for publication 31.10.2021.

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: Prolygin A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N. P. Influence of soil moisture on the deformation properties of soil-crushed stone samples during compression. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 614-632. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

© Prolygin A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N.P., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В дорожном строительстве принято выделять автомобильные дороги с низкой интенсивностью движения (НИД) в отдельную группу. Для этих дорог разрабатываются специальные нормативные документы. Актуальность таких работ обусловлена достаточно большой протяженностью дорог с низкой интенсивностью движения в составе сети дорог разных стран. Например, в США протяженность дорог с низкой интенсивностью движения оценивается почти в 80% от протяженности общей сети. В Швеции и Финляндии протяженность таких дорог в общей сети составляет до 60 и 70% соответственно. В Российской Федерации дороги с низкой интенсивностью движения имеют протяженность, составляющую более 70% общей протяженности автомобильных дорог. Таким образом, в России протяженность дорог с низкой интенсивностью дороги большая, но такие дороги выделены в отдельную группу дорог только в 2011¹ г. В 2015 г. введены в действие строительные правила², регламентирующие методику проектирование дорог с НИД, а в 2019 и 2020 гг. вышли в свет ПНСТ³ и ГОСТ⁴, устанавливающие правила конструирования и расчета дорожных одежд переходного и низшего типов для дорог с НИД. Появление этих стандартов завершает процесс разделения методов проектирования дорожных одежд на две группы: традиционные – для дорог общего

пользования и методы для дорог с НИД, основанные на новом методе расчета по глубине колеи и расчете по модулю деформации, созданном группой Н.Н. Иванова и применявшемся в первой инструкции ВСН 46-60.

Раздел конструирования дорожных одежд для дорог с НИД, регламентируемый ПНСТ 371-2019, содержит указания по применению в конструкциях местных материалов. Различные регионы РФ обладают разными местными материалами. В связи с этим специалисты разных регионов РФ выполняют исследования по применению разных материалов, характерных для конкретного региона, в конструкциях одежд низшего и переходного типа. Примером таких исследований являются документы, разработанные научными группами: ВолГАСУ (руководитель С.В. Алексикова)^{5,6}, ЗАО «Транспроект» (с привлечением специалистов КазГАСУ и МАДИ В.А. Вдовина и Д.М. Немчинова)⁷, СибАДИ и КУ УДХ Омской области (основные исполнители и консультанты В.В. Сиротюк, Г.В. Долгих, А.С. Александров, Д.Х. Курманов, А.Г. Зверев)⁸.

В решении проблемы конструирования дорожных одежд для дорог с НИД специалисты практики и научные работники в области строительства дорог идут путем, проторенным специалистами дорожных департаментов и вузов США, выполняя работы в виде науч-

¹. ОДМ 218.2.017-2011. Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог с низкой интенсивностью. Введен в действие 13.07.2012. Введен впервые. М.: ФГУП «РОСДОРНИИ», 2012.

². СП 243.1326000.2015. Проектирование и строительство автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения. Введен в действие 01.12.2015. М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2015.

³. ПНСТ 371-2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожные одежды. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

⁴. ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 15.04.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020.

⁵. СТО.25106343.02-2014. РМД Проектирование дорожных одежд низшего типа с использованием материалов прирассовых карьеров. Региональный методический документ. Махачкала, 2015.

⁶. Региональный дорожный документ. РДМ 218/34.1.001-2002 Основание дорожной одежды из грунта повышенной плотности. Волгоград, 2003.

⁷. СТО 4800-001-57253637-2011. Проектирование сельских дорог в республике Татарстан. Казань: ГУ Главтатдортранс, 2011. 21 с.

⁸. СТО 03709897-001-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование, строительство, капитальный ремонт и ремонт дорожных одежд низшего типа. Введен в действие 31.05.2021. Омск, 2021. 72 с.

но-технических отчетов^{9,10,11,12} с публикацией новых материалов в статьях [1, 2, 3, 4, 5]. В вузах РФ выполняются исследования в аналогичных направлениях.

Актуальность таких работ и применение полученных в них результатов в практике проектирования дорожных одежд для дорог с НИД Омской области подтверждается данными территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Омской области. Согласно этим данным общая протяженность дорог в Омском регионе составляет 25212,5 км, в том числе 23878,4 км дорог общего пользования и 1334,1 дорог необщего пользования. Протяженность дорог общего пользования складывается из протяженности федеральных дорог, дорог регионального или межмуниципального значения и дорог местного значения. Протяженность федеральных дорог составляет 729,5 км, дорог регионального или межмуниципального значения – 10200,1 км, а дорог местного значения – 12948,8 км. К дорогам с низкой интенсивностью движения относятся все дороги местного значения и часть дорог межмуниципального значения с интенсивностью движения менее 400 авт./сут. На протяжении более 10000 км такие дороги имеют грунтовую поверхность, для них остро необходима постройка экономичных дорожных одежд.

В ФГБОУ ВО «СибАДИ» силами трех кафедр: «Проектирование дорог», «Строительство и эксплуатация дорог», «Мосты и тоннели» выполнена большая работа по исследованию физико-механических свойств, параметров прочности и деформируемости, гранулометрического состава техногенных грунтов и отходов промышленности. Изучены свойства геотекстилей, плоских и объемных георешеток. Разработаны методики расчета дорожных одежд с такими материалами. В числе этих многочисленных работ отметим исследования:

- золоминеральных смесей и зол уноса [6, 7, 8, 9, 10];
- белитового шлама [11, 12, 13];
- геосинтетических материалов [14, 15, 16, 17, 18, 19];
- модификации условий пластичности [20, 21];
- теоретические [22] и экспериментальные работы [23, 24] по определению напряжений в земляном полотне и слоях конечной толщины;
- совершенствование расчетов дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу [25, 26, 27] и накоплению остаточных деформаций [28].

Анализ работ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19] показывает, что для применения отходов промышленности в дорожных одеждах необходимо выполнение большого количества экспериментальных работ. Такие исследования требуют затрат времени, а значит, внедрение технических решений не может быть быстрым. Поэтому возникает задача разработки конструкций дорожных одежд из местных материалов. Сложность задачи заключается в отсутствии в Омском регионе месторождений горных пород, поэтому щебень, щебеночно-песчаные и песчано-гравийные смеси привозят из Уральского региона России и республики Казахстан. Затраты на транспортировку зернистых материалов велики.

В качестве альтернативы щебеночным материалам в дорожных одеждах применяют грунты, укрепленные или стабилизированные вяжущими и полимерными материалами [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]. В целях экономии щебня его тоже укрепляют вяжущими материалами, повышая прочность и понижая деформируемость, что позволяет уменьшить толщину слоя в дорожной одежде. В этих же целях щебеночные основания дорожных одежд армируют геосинтетическими материалами [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]. Преимущество укрепленных грунтов и зернистых материалов перед традиционными щебеночными материалами состоит в снижении остаточных

⁹ White D.J. et al. Fly Ash Soil Stabilization for NonUniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa. 2005.

¹⁰ Hoover J.M., et al. Performance of randomly oriented, fiber-reinforced roadway soils: A laboratory and field investigation. Iowa Highway Research Board Project HR-211, Engineering Research Institute, Iowa State University, Ames, Iowa. 1982.

¹¹ White D.J. et al. Mechanical Stabilization of Subgrade Layer. Tech Brief, Boone County Expo Test Sections, Boone County Expo, Iowa Department of Transportation, Ames, Iowa. 2013..

¹² Jobgen M.C. et al. Low cost techniques of base stabilization. Project HR-312, Iowa Department of Transportation, Ames, Iowa. 1994.

деформаций, возникающих от повторных нагрузок. Авторы работ [47, 48, 49, 50] сообщают, что зернистые материалы склонны к накоплению остаточных деформаций при возникновении сравнительно малых девиаторов σ_d , величина которых определяется разностью максимального и минимального главных напряжений. Кроме того, грунты и зернистые материалы обладают сравнительно невысокими характеристиками сопротивления сдвигу [51, 52]. Это может стать причиной формирования колеи типа I и типа II [53, 54, 55, 56, 57], которые возникают в результате деформаций сдвига либо в покрытии из гранулированного материала (колея типа I), либо грунта в земляном полотне (колея типа II).

ПНСТ 371-2019 регламентирует выполнять расчет дорожной одежды для автомобильной дороги с НИД по двум критериям. Первый критерий состоит в расчете по прочности, целью которого является обеспечение на поверхности дорожной одежды общего модуля деформации, величина которого не должна быть меньше требуемого значения, но и не превышать требуемое значение более чем на 10%. Второй критерий допускает образование колеи, глубина которой не должна превышать предельного значения. Для обоих расчетов необходимо использовать модуль деформации материала слоя.

В настоящее время выполняются экспериментальные работы по определению модулей деформации различных материалов. Целью данной статьи является исследование зависимости модуля деформации грунтощебеночного образца от дозировки щебня и влажности грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение значений деформационных характеристик грунтов и зернистых материалов лабораторными испытаниями производят одним из четырех способов, к которым относят методы: одноосного, трехосного и компрессионного сжатия, а также метод одноплоскостного среза. Каждый из этих методов позволяет определить определенные деформационные характеристики, например, продольный, поперечный или объемный модуль деформации, коэффициент Пуассона. Перечисленные параметры материала подобны его упругим характеристикам, но отличаются тем, что ха-

рактеризуют упругопластическую деформацию. Поэтому при лабораторных испытаниях достаточно определить только одну пару упругопластических постоянных, например, продольный модуль деформации и коэффициент Пуассона. По этим двум значениям можно вычислить любую из трех других деформационных характеристик: объемный и поперечный модуль деформации, постоянную Ламе. Для таких вычислений применяют классические зависимости.

Рассматривая методы лабораторных испытаний, отметим, что при компрессионных испытаниях деформации поперечного расширения образца отсутствуют, то есть равны нулю. В реальных условиях работы грунты земляного полотна и зернистые материалы слоев дорожной одежды испытывают трехосное сжатие с определенной степенью стеснения деформаций бокового расширения. Наименьшие боковые деформации грунта возникают в области массива, расположенной под штампом. С глубиной деформации бокового расширения увеличиваются и теоретически на глубине равной бесконечности достигают значений, характерных для одноосного сжатия. Таким образом, трехосные испытания самым лучшим образом соответствуют реальным условиям работы грунтов и зернистых материалов. Но для выполнения таких испытаний с грунтощебеночными материалами требуются специальные приборы трехосного сжатия, позволяющие испытывать образцы больших размеров. Приготовление таких образцов имеет свои особенности, состоящие в том, что формовку образца выполняют удалением воздуха из пор при помощи системы вакуумирования. В этом случае при больших размерах образца возникает сложность с определением его массы и плотности сухого грунта. В результате нет возможности оценить достаточность уплотнения зернистого материала в образце.

На рисунке 1 приведены фрагменты трехосных испытаний, выполненных А. Мирным в лаборатории МГСУ¹³. На рисунке 1, а представлен общий вид установки трехосного сжатия, предназначенной для испытания цилиндрических образцов из крупнообломочного грунта диаметром 30 см и высотой 60 см. Установка снабжена камерой трехосного сжатия, компьютером с программным обеспечением, позволяющим проводить необходимое

¹³ Иллюстрации испытаний подготовлены при помощи функции prt sc с обучающего видеофильма «Установка трехосного сжатия для испытания крупнообломочных грунтов», находящегося в открытом доступе на канале YouTube.



Рисунок 1 – Трехосные испытания крупнообломочного грунта в лаборатории МГСУ при помощи прибора конструкции НПО «Геотек»:
 а – общий вид прибора; б – натягивание эластичной оболочки на нижний штамп;
 в – установка частей цилиндрической обоймы; г – укладка фильтровальной бумаги;
 д – послойная засыпка и ручное уплотнение грунта; е – укладка верхней фильтровальной бумаги;
 ж – установка верхнего фильтрующего диска; з – установка верхнего штампа;
 и – крепление эластичной оболочки; к – подключение системы вакуумирования; л – демонтаж обоймы;
 м – проверка сохранения образцом формы; н – установка камеры трехосного сжатия;
 о – управление испытанием при помощи компьютера

Figure 1 – Three-axis tests of large-grained soil in the laboratory of the Moscow State University with the aid of the device of the NGO «Geotek»:
 а – general view of the instrument; б – stretching of the elastic envelope on the lower stamp;
 в – installation of parts of the cylindrical casing; г – laying of filter paper; д – layer filling and manual compaction;
 е – top laying; ж – installation of the top filter disk; з – installation of the top stamp;
 и – fixation of the elastic envelope; к – connection of the vacuum system; л – dismantling of the clip;
 м – verification of the shape retention of the sample; н – installation of the three-axis compression chamber;
 о – test management by computer

испытание и обрабатывать его результаты. В комплект установки входят: нижний и верхний штампы, к каждому из которых прилагается фильтрующий диск и круг фильтровальной бумаги; эластичная оболочка; цилиндрическая обойма, состоящая из двух частей; система вакуумирования, снабженная шлангами для откачки воздуха из пор грунта, размещенного в оболочке и обойме; резиновые кольца и металлические хомуты, предназначенные для закрепления оболочки на нижнем и верхнем штампах; датчики давления в камере и вертикальных перемещений. Применение системы вакуумирования позволяет откачать воздух из пор образца за несколько минут. Готовность образца к испытанию определяют визуально, проверяя, держит ли образец форму. Если образец не меняет форму, то обе части обоймы снимают, а на образец устанавливают камеру трехосного сжатия, закрепляя ее болтами на нижнем штампе, то есть качество уплотнения материала оценивается визуально.

В нашей грунтовой лаборатории имеются приборы трехосного сжатия, позволяющие испытывать образцы диаметром 5 см и высотой 10 см. В этом случае размер скелетной добавки щебня необходимо ограничить фракцией 4–8 мм. Малые размеры образца позволяют определить его массу и контролировать плотность, а также коэффициент уплотнения грунтощебня, применяя для определения максимальной плотности материала метод Проктора. Но возникает другая проблема, она связана с несоответствием зернового состава образца гранулометрическому составу смесей, применяемых в дорожном строительстве. В образце отсутствует каркасная фракция.

Кроме того, значения модулей деформации, полученные по данным трехосных испытаний, вычисляют либо по отношению приращений максимального главного напряжения к соответствующим приращениям вертикальной деформации образца, либо отношением приращений девиатора напряжений к соответствующим приращениям деформации. Выбор того или иного способа обуславливается математической моделью, связывающей модуль деформации с характеристикой напряженного состояния, которой могут быть главные напря-

жения или девиатор. Штамповой модуль деформации зависит от размеров штампа и соответствующих приращений давления и осадки. Поэтому вычисление штамповой модуль деформации через значение этого параметра, полученного по данным трехосных испытаний, требует ввода специальных коэффициентов. Эти коэффициенты подобны коэффициентам Агишева, применяемым для вычисления штамповой модуль деформации по данным компрессионных испытаний. Подобные коэффициенты можно ввести при расчете модуль деформации через значение этого параметра, полученные на основе испытаний по одноосному сжатию.

Сравнивая виды сжатия: гидростатическое, компрессионное, трехосное с ограниченным боковым расширением образца и одноосное, можно прийти к выводу, что одноосный эксперимент создают наихудшие условия работы образца. Для таких экспериментов возможно создание образцов диаметром 10 см и высотой 20 см. В этом случае, по сравнению с образцами, приготавливаемыми для трехосных испытаний, можно использовать более крупные фракции щебня. Размеры образца для одноосного сжатия позволяют определить его плотность, а затем и коэффициент уплотнения, используя метод Р. Проктора для определения максимальной плотности. Поэтому, взвесив недостатки всех методов, в наших исследованиях использован метод одноосного сжатия.

Для таких испытаний изготавливались образцы цилиндрической формы высотой 20 см и диаметром 10 см. Диаметр образца определил максимальный размер зерен щебня, используемого при изготовлении образца. Для изготовления образца применен щебень из смеси фракций 5–10 и 10–20 мм. Отдельными лабораторными испытаниями определены все контролируемые параметры щебня, на основе чего установлено, что щебень соответствует требованиям ГОСТ 8267–93¹⁴. В качестве грунта, применяемого для изготовления образцов, взят суглинок тяжелый пылеватый. Классификация грунта выполнена по ГОСТ 25100–2020¹⁵ на основе данных лабораторных испытаний по определению влажностей на границах текучести и раскатывания (по

¹⁴. ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введен в действие 17.06.1994. Взамен ГОСТ 8267–82, ГОСТ 8268–82, ГОСТ 10260–82, ГОСТ 23254–78, ГОСТ 26873–86. М.: Стандартинформ, 2018.

¹⁵. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Введен в действие 01.01.2021. Взамен ГОСТ 25100–2011. М.: Стандартинформ, 2020.

ГОСТ 5180–2015¹⁶), а также зернового состава (ГОСТ 12536–2014¹⁷). Максимальная плотность и оптимальная влажность определены испытанием по стандартному уплотнению (по ГОСТ 22733–2016¹⁸). Максимальная плотность грунта составила 1,69 г/см³, а оптимальная влажность 18,3%.

Высота образца 20 см обусловлена общими требованиями к испытанию цилиндрических грунтовых образцов. Как правило, для испытаний применяют образцы с соотношением высоты к диаметру, равному 2. Поэтому при диаметре образца 10 см его высота должна быть 20 см. Учитывая необходимую высоту образцов 20 см, при их изготовлении применяли две цилиндрические разъемные формы от двух одинаковых приборов. Для создания условий трамбовки грунта аналогичных условиям при стандартном уплотнении в большом приборе необходимо увеличить число уплотняемых слоев. При изготовлении образца в большом приборе стандартного уплотнения учитывали, что при применении методики, регламентируемой ГОСТ 22733–2016, изготовление образца высотой 10 см выполняется трамбовкой трех слоев грунта. Следовательно, для изготовления образца высотой 20 см по методике стандарта РФ необходимо трамбовать шесть слоев. Количество ударов по каждому слою приняли стандартным, то есть по 40 ударов на слой. По завершении уплотнения каждого слоя, за исключением верхнего шестого слоя, на поверхности каждого слоя ножом наносили насечки. Это позволяло обеспечить сцепление слоев в образце. После уплотнения верхнего слоя дополнительную насадку снимали и, срезая лишний грунт, выравняли поверхность образца вровень с верхней кромкой второй разъемной формы. Методика эксперимента предполагала варьирование влажности суглинка тяжелого в образцах грунтощебня. Для этого образцы, изготовленные при оптимальной влажности суглинка 18,3% и щебня 4,8%, увлажняли. Увлажнение образцов выполняли подводом воды к нижней части образца, используя капиллярный подъем. Для этого нижняя часть образца оборачивалась фильтровальной бумагой, которая крепилась при помощи канцелярских

резинок. Образец помещали в сосуд с водой так, чтобы верхняя кромка воды не превышала уровень фильтровальной бумаги. Фильтровальная бумага предотвращала вымывание частиц грунта из образца. Водонасыщение образца за счет капиллярного поднятия воды выполняли с разным временем для различных групп образцов. Это позволяло получить группы образцов с различной влажностью грунта. Перед проведением испытания на одноосное сжатие образцы извлекали из сосуда с водой и освобождали от фильтровальной бумаги. На рисунке 2 приведены основные этапы изготовления образца.

После водонасыщения, для более равномерного распределения влаги по порам грунтощебеночного материала, образцы выдерживали в эксикаторах, закрытых крышкой в течение суток.

Для выполнения испытаний применен измерительно-вычислительный комплекс, в состав которого входят: разрывная машина и компьютер с программным обеспечением, управляющий испытанием. Непосредственно перед выполнением испытания производили измерение геометрических размеров образца: высоты и диаметра, данные о которых оператор вносил в программу испытаний.

Грунтощебеночный образец размещали на основании разрывной машины и прикладывали сжимающую нагрузку со скоростью 3 мм/мин. Испытание выполняли либо до разрушения образца, либо до достижения деформацией образца предельного значения. Предельное значение деформации принято 15%, его задавали в программе испытаний. Такая предельная деформация обеспечивает линейное деформирование образцов с высокой влажностью грунта на начальном этапе приложения нагрузки и нелинейное деформирование на втором этапе. Испытание выполнялось в автоматическом режиме. В качестве результатов испытаний программа выполняет построение зависимости деформаций образца от давления и приводит данные о максимальной деформации образца и максимальном давлении, которое выдержал образец при максимальной деформации.

¹⁶ ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введен в действие 01.04.2016. Взамен ГОСТ 5180–84. М.: Стандартинформ, 2019.

¹⁷ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019.

¹⁸ ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Введен в действие 01.01.2017. Взамен ГОСТ 22733–2002. М.: Стандартинформ, 2019.



Рисунок 2 – Подготовка образца к испытанию: а – подача грунтощебеночного материала в цилиндрическую форму; б – трамбовка материала; в – устройство насечек на уплотненной поверхности; г – разбор цилиндрических форм; д – образец с фильтровальной бумагой, подготовленный для насыщения водой; е – освобождение образца от бумаги; ж – образец, подготовленный к испытанию

Figure 2 – Sample preparation for testing: а – innings soil-crushed-stone materials into a cylindrical form for compaction of the first layer; б – ramming of material; в – notching the compacted surface; г – parsing of cylindrical forms; д – sample with filter paper prepared for capillary saturation with water; е – freeing the sample from paper; ж – sample prepared for testing

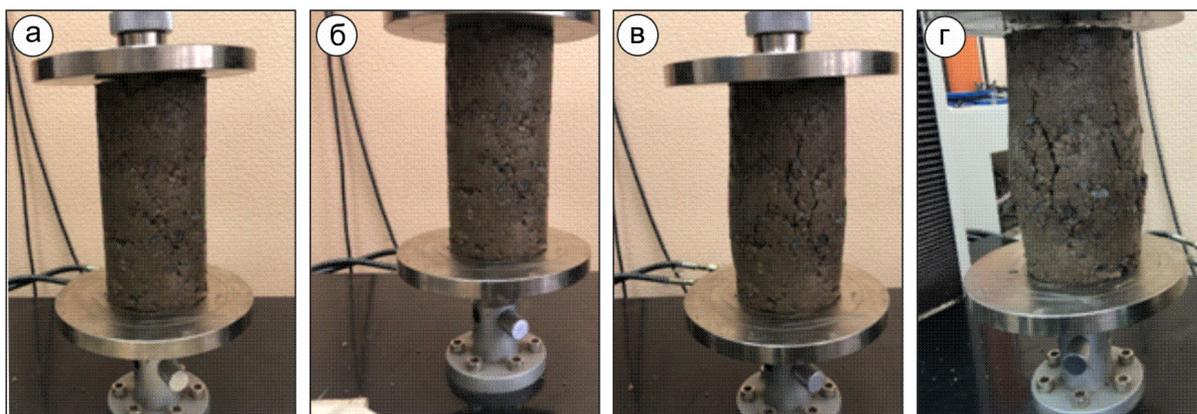


Рисунок 3 – Иллюстрации строительства и испытания модели земляного полотна: а – образец помещен на основание разрывной машины; б – начало испытания; в – появление трещин при деформировании образца; г – завершённое испытание по достижению предельной деформации

Figure 3 – Illustrations of construction and testing of a model of subgrade: а – the sample is placed on the base of the tensile testing machine; б – start of test; в – appearance of cracks during deformation of the sample; г – completed test at reach ultimate deformation

Произведено испытание шести групп образцов, в каждой из которых влажность суглинка в грунтощебеночных образцах была одинакова, но отличалась от влажностей образцов в других группах. Иллюстрации испытаний приведены на рисунке 3.

Для вычисления модуля деформации применялась скорректированная зависимость вертикальной деформации образца от давления. Для корректировки этой зависимости использован метод, регламентируемый стандартами ASTM D1883-2016¹⁹, AASHTO T 193-

¹⁹ ASTM D1883-2016 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.

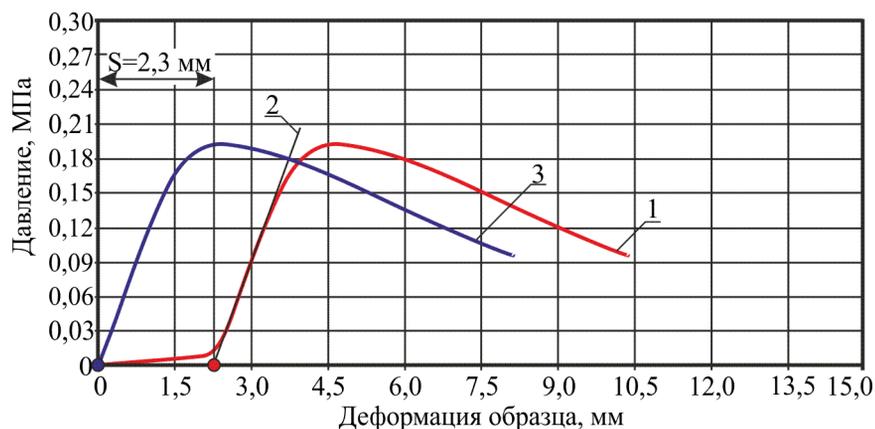


Рисунок 4 – Графическая иллюстрация пояснений по корректировке зависимости осадки образца от давления:
 1 – фактическая нескорректированная зависимость;
 2 – прямая необходимая для корректировки;
 3 – скорректированная зависимость осадки образца от давления

Figure 4 – Graphical illustration of explanations for correcting the dependence of sample settlement from pressure: 1 – actual unadjusted dependence; 2 – straight line required for adjustment; 3 – corrected dependence of sample settlement from pressure

13 (2021)²⁰, при определении калифорнийского числа несущей способности грунта. Этот же метод реализован в ПНСТ 323-2019, являющимся российским аналогом стандартов США.

Суть корректировки зависимости деформации образца от давления показана на рисунке 4.

Характерной особенностью кривой 1, отображающей зависимость деформации образца от давления, является наличие вогнутого начального участка. Наличие такого вогнутого участка в начале деформирования характерно для большинства из испытанных нами образцов. Вогнутость начального участка обуславливается неровностью поверхности образца и отсутствием надежного контакта по всей контактной площади плунжера с образцом. Вогнутую часть графика использовать нельзя, она должна быть скорректирована.

Для корректировки кривой 1, показанной на рисунке 4, на ней выбирается прямолинейный участок, по точкам которого проводится прямая 2. Пересечение этой прямой, обозначенной на рисунке 4 номером 2, с осью деформации дает точку, а расстояние от этой точки до начала координат позволяет вычислить величину поправки S . Из данных рисунка 4 сле-

дует, что значение поправки S составляет 2,3 мм. Величина найденной поправки вычитается из значений деформаций фактической нескорректированной зависимости, а найденные разности являются деформациями скорректированной зависимости, обозначенной на рисунке 4 цифрой 3. Таким образом, при построении скорректированной зависимости нужно для каждого значения давления определить соответствующую ему величину деформации для нескорректированной зависимости и вычесть из нее величину поправки, получив скорректированную величину деформации. Следовательно, при корректировке данных испытаний значения давлений одинаковы для нескорректированной и скорректированной зависимости, а деформации образца для этих зависимостей различны.

По скорректированной зависимости деформации от давления вычисляли модуль деформации грунтощебеночного материала. Для этого рассматривали возможность определения секущего, касательного и кусочно-линейного нелинейного модуля. Схемы, поясняющие определение этих модулей, показаны на рисунке 5.

²⁰ AASHTO T 193-13 (2021). Standard Method of Test for The California Bearing Ratio

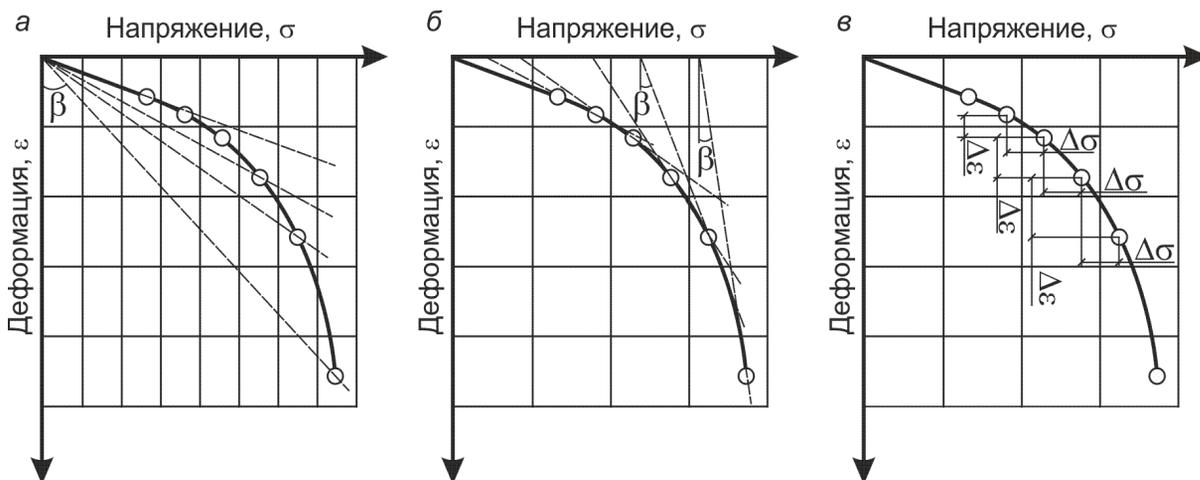


Рисунок 5 – Диаграммы сжатия: а, б, в – схемы определения секущего, касательного и кусочно-линейного модуля

Figure 5 – Compression diagrams: a, b and c – schemes for determining the secant, tangent and piecewise linear modulus

Секущий модуль деформации определяется арктангенсом угла (β), показанного на рисунке 5, а, то есть $E = \text{arc tg } \beta$. Для определения касательного модуля деформации к выбранной на графике точке нужно провести касательную, как это показано на рисунке 5, б. После этого касательный модуль определяется по аналогии с секущим модулем, то есть арктангенсом угла (β). При вычислении кусочно-линейного модуля используют приращение деформаций $\Delta \epsilon$ и напряжений $\Delta \sigma$ от двух последовательно приложенных нагрузок, а модуль определяют отношением $E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$. Схема определения приращений приведена на рисунке 5, в. Результаты определения кусочно-линейного модуля можно интерпретировать как нелинейный модуль. На рисунке 5, а; 5, б; и 5, в приведены характерные пределы напряжений, предел пропорциональности R_{pr} и предел прочности R_c . Предел пропорциональности характеризует наибольшую величину напряжения, при которой сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. В пределах этой линейной зависимости деформации являются упругопластическими, а не упругими как у монолитных материалов. Следовательно, секущий модуль, определенный для напряжения или давления, величина которого соответствует пределу пропорциональности, имеет максимальное из всех значений, принимаемых модулем деформации в пределах кривой деформирования. Этот модуль соответствует линейной зависимости осадки от давления, постулируемой в

нормативном методе расчета дорожной одежды. Поэтому именно этот модуль был нами принят при обработке экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 6 представлен пример определения секущего модуля деформации для одного из испытанных образцов.

Для определения секущего модуля деформации на графике, отображающей зависимость относительной деформации от давления на образец, необходимо провести прямую, соединяющую начало координат с интересующей точкой на графике. В качестве такой точки нами выбрана точка, ограничивающая стадию линейных деформаций, то есть участок кривой, на котором зависимость деформации от давления линейная. Далее для выбранной точки определяют давление и соответствующую этому давлению общую относительную деформацию. Согласно данным, представленным на рисунке 6, выбранной на графике точке соответствует давление 0,135 МПа и относительная деформация 0,0059. Секущий модуль деформации находят отношением давления к деформации в выбранной точке. Таким образом, модуль деформации составил 22,9 МПа. Отметим, что этот модуль деформации получен при испытании грунтощебеночного образца с содержанием щебня 50% по объему смеси и при оптимальной влажности грунта в образце.

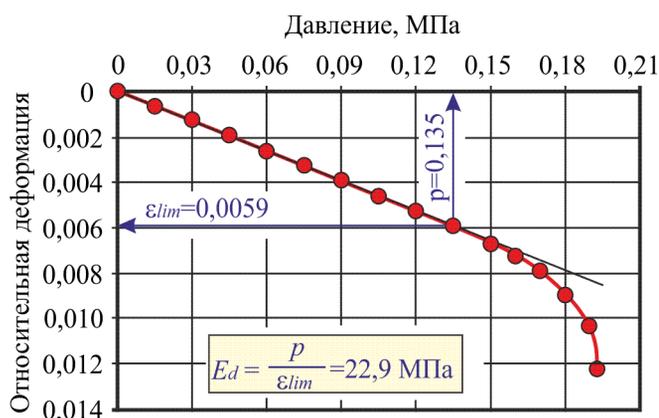


Рисунок 6 – Вычисление секущего модуля деформации

Figure 6 – Calculation of the secant deformation modulus

Таблица 1
Секущие модули деформации грунтощебеночных образцов

Table 1
Secant modulus of deformation of soil-crushed-stone samples

Содержание щебня, % по объему	Номер опыта	Модуль деформации грунтощебня, МПа в зависимости от влажности суглинки в образце, %					
		18,3	20,1	22,8	26,1	29,4	32,6
40	1	15,2	13,0	9,9	8,6	8,2	7,3
	2	13,8	11,9	9,8	8,8	8,3	8,0
	3	14,6	12,7	9,2	8,9	8,5	7,8
	4	13,5	12,8	9,4	8,3	8,1	8,2
	5	14,4	12,1	10,1	9,1	7,6	7,5
	6	14,8	13,4	10,3	8,1	7,7	7,9
50	1	20,3	19,3	16,5	14,1	13,9	13,0
	2	19,7	18,7	15,0	15,1	12,4	12,0
	3	22,9	20,6	14,6	13,4	13,1	12,4
	4	21,4	18,3	15,9	13,7	12,8	12,7
	5	22,1	19,9	14,2	13,0	13,5	13,1
	6	20,8	17,7	15,4	14,6	14,4	14,0
60	1	24,2	22,1	20,1	16,9	16,4	17,9
	2	25,8	23,9	18,9	17,5	17,0	17,5
	3	26,0	23,7	19,8	18,5	18,0	16,6
	4	23,1	21,3	20,3	17,7	17,2	16,7
	5	24,0	22,3	18,7	18,8	18,3	15,9
	6	25,4	23,4	18,0	19,0	18,5	17,8

В таблице 1 приведены частные значения секущих модулей деформации, вычисленных по результатам испытания грунтощебеночных образцов.

Выборки частных значений модулей деформации проверены на наличие грубых ошибок по правилам, регламентируемым ГОСТ 20522–2012²¹. Установлено, что выборки не

²¹. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введен в действие 01.07.2013. Взамен ГОСТ 20522–96. М.: Стандартинформ, 2013.

Таблица 2
Результаты вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя

Table 2
The results of calculating the deformation modulus of the soil-crushed-stone layer

Содержание щебня, % по объему	Наименование статистики 18,3	Величина статистики в зависимости от влажности суглинка в образце, %					
		20,1	22,8	26,1	29,4	32,6	
40	Среднее значение, МПа	14,4	12,7	9,8	8,6	8,1	7,8
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	0,63	0,56	0,42	0,38	0,35	0,33
	Коэффициент вариации, %	4,4	4,5	4,3	4,4	4,4	4,3
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	13,7	12,1	9,3	8,2	7,7
максимальное		15,0	13,2	10,2	9,0	8,4	8,1
50	Среднее значение, МПа	21,2	19,1	15,3	14,0	13,4	12,9
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	1,18	1,07	0,85	0,78	0,74	0,69
	Коэффициент вариации, %	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5	5,3
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	20,0	18,0	14,4	13,2	12,6
максимальное		22,4	20,2	16,2	14,8	14,1	13,6
60	Среднее значение, МПа	24,8	22,8	19,3	18,1	17,6	17,1
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	1,16	1,04	0,91	0,83	0,83	0,79
	Коэффициент вариации, %	4,7	4,5	4,7	4,6	4,7	4,6
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	23,5	21,7	18,3	17,2	16,7
максимальное		26,0	23,9	20,3	18,9	18,4	17,9

содержат грубых ошибок, вследствие чего отсеивания частных значений из выборок не требуется. После проверки на наличие грубых ошибок выборки модулей деформации обработаны методами математической статистики с применением нормального закона распределения случайной величины, в соответствии с требованиями ГОСТ 20522–2012 при двусторонней доверительной вероятности 0,95. Результаты статической обработки, а именно вычисления среднего значения, расчетных значений модуля деформации и все необходимые для этих вычислений математические статистики приведены в таблице 2.

Для математического моделирования вычислены относительные влажности грунта, применяемого в грунтово-щебеночной смеси, они рассчитаны отношением влажностей грунта, представленных в таблицах 1, 2, к влажности на границе текучести. Влажность на границе текучести определена предварительными испытаниями суглинка тяжелого, она составляет 36,6%. Также вычислены относительные значе-

ния модуля деформации. Эти значения определены отношением модулей деформации, полученных для каждой влажности, к модулям деформации, полученным при оптимальной влажности грунта в образце, то есть при влажности 18,3%. Относительные значения модуля деформации показывают, во сколько раз модуль деформации грунтощебеночного материала при естественной влажности грунта в нем меньше модуля деформации этого материала при оптимальной влажности грунта. Поэтому эти относительные значения можно использовать в качестве поправок к модулям деформации грунтощебеночного материала с оптимальной влажностью грунта в нем, вычисленным по результатам штамповых испытаний. Значения поправок приведены в таблице 3.

При аппроксимации полиномом третьей степени расчет поправки k_w выполняется по формуле

$$k_w = b_0 + b_1 \cdot \frac{w}{w_T} + b_2 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^2 + b_3 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^3, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 , b_2 и b_3 – постоянные коэффициенты многочлена третьей степени, зависящие от содержания щебня.

В таблице 4 приведены значения постоянных коэффициентов полинома третьей степени (1) и величина коэффициента детерминации для каждой математической модели.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что для расчета постоянных коэффициентов полинома третьей степени (1) можно подобрать эмпирические формулы, связывающие значения этих коэффициентов с содержанием щебня по объему. Такие эмпирические формулы приведены в таблице 5.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночных образцов позволили определить поправочные коэффициенты k_w .

Для вычисления значения коэффициента разработана математическая модель, связывающая этот коэффициент с относительной влажностью связного грунта, применяемого в грунтощебеночной смеси, и содержанием в ней щебня смеси при проектировании дорожных одежд низшего типа. В результате появляется возможность вычисления модуля деформации грунтощебеночного материала в конструктивном слое дорожной одежды при любой относительной влажности, применяемого связного грунта, путем вычисления простого произведения

$$E_{dw(cal)} = k_w \cdot E_{dw(opt)}. \quad (2)$$

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночного материала можно использовать при проектировании конструкций дорожных одежд на опытных участках.

Таблица 3
Поправки к значениям модуля деформации грунтощебня k_w на относительную влажность грунта в нем

Table 3
Corrections to the values of the deformation modulus of soil-crushed-stone k_w to the relative soil moisture

Содержание щебня, % по объему	Величина поправки при относительной влажности грунта (W/Wт)					
	0,50	0,55	0,62	0,71	0,80	0,89
40	1,00	0,88	0,68	0,60	0,56	0,54
50	1,00	0,90	0,72	0,66	0,63	0,61
60	1,00	0,92	0,78	0,73	0,71	0,69

Таблица 4
Значения параметров формулы (1) и коэффициенты детерминации

Table 4
Values of the parameters of formula (1) and the coefficients of determination

Содержание щебня, % по объему	Значения постоянных коэффициентов полинома (1)				R2
	b_0	b_1	b_2	b_3	
40	6,3535	-20,004	23,123	-8,9699	0,993
50	6,0134	-19,054	22,597	-8,9977	0,989
60	5,0753	-15,592	18,679	-7,5216	0,990

Таблица 5
Эмпирические зависимости для расчета параметров формулы (1)

Table 5
Empirical dependencies for calculating the parameters of the formula (1)

Коэффициент формулы (1)	Формула для расчета
b_0	$b_0 = 1,7339 + 0,2351 \cdot X - 0,003 \cdot X^2$
b_1	$b_1 = 1,316 - 1,0354 \cdot X + 0,0126 \cdot X^2$
b_2	$b_2 = 1,4738 \cdot X - 0,017 \cdot X^2 - 8,693$
b_3	$b_3 = 6,1803 - 0,6795 \cdot X + 0,0075 \cdot X^2$
где X – содержание щебня в смеси, % по объему	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kettle R.J., McCabe E.Y. Mechanical Stabilization for the Control of Frost Heave. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2011. 12(4): 899-905. DOI:10.1139/l85-102.
2. Mahedi M., Cetin B., White D.J. Closure to "Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. 33(9):07021013. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003868.
3. Coban H.S., et al. Effects of Using Recycled Aggregates and Large Stones for Base and Subbase Layers on Modulus Properties of Pavements. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) *Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. 164. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-77230-7_28.
4. Han J., Leshchinsky D. Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010. Vol. 28(3): 262-267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012.
5. Tang X.C., Chehab G.R., Palomino A. Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008. 9(6): 413-429. DOI:10.1080/10298430802279827.
6. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог // *Техника и технологии строительства*. 2015. № 1(1). С. 24–31.
7. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Барац Н.И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 6(52). С. 72–79. DOI:10.26518/2071-7296-2016-6(52)-72-79.
8. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1(53). С. 103–110. DOI:10.26518/2071-7296-2017-1(53)-103-110.
9. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. № 2(21). С. 215–227. DOI:10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227.
10. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 74(6): 3–16. DOI:10.18720/MCE.74.1.
11. Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 6(17). С. 764–776. DOI:10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776.
12. Лыткин А.А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 3(55). С. 125–132. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132
13. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 2020. 992, 79–85. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.
14. Шнайдер В.А., Левашов Г.М., Сиротюк В.В. Определение требуемой прочности геосинтетических материалов для противозерозионной защиты неподтопленных откосов земляного полотна // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 1(47). С. 72–80.
15. Матвеев С.А., Литвинов Н.Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 4(32). С. 57–61.
16. Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 4(44). С. 80–86. DOI:10.26518/2071-7296-2015-4(44)-80-86
17. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 94(2): 21–30. DOI: 10.18720/MCE.94.3
18. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 662:164-167. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.662.164
19. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 587-589: 1137-1140. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1137
20. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. Эмпирические условия пластичности в расчетах земляного полотна по сдвигу // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 10(85). С. 7–20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1.
21. Калинин А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 4(39). С. 35–45. DOI: 10.5862/MCE.39.4.
22. Кузин Н.В., Александров А.С. Об изменении напряжения вертикального сжатия в дорожных конструкциях // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: строительство и транспорт*. 2007. № 4(16). С. 221–225.
23. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2): 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7
24. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021. 58(1): 2–7. DOI:10.1007/s11204-021-09700-8
25. Долгих Г.В. Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасных давлений // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 6(34). С. 43–49.
26. Долгих Г.В. Определение первой критической нагрузки при расчете грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2016. № 3(46). С. 90–97.

27. Александрова Н.П., Семенова Т.В., Долгих Г.В. Совершенствование моделей расчета главных напряжений и девиатора в грунте земляного полотна // Вестник СибАДИ. 2014. № 2(36). С. 49–54.
28. Александров А.С. Исследование пластического деформирования дискретных материалов при воздействии циклических нагрузок и определение параметров математических моделей // Строительные материалы. 2016. №10. С. 27–32.
29. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. *Advanced Materials Research*. 2014. 1020: 31–36. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.31
30. Iliina, O.N., Ilin, I.B. Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 92(8): 115–126. DOI: 10.18720/MCE.92.10
31. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753, pp. 1-5. DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032006
32. Rudgalskiy, D. et al. Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1614: 1-9. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012004
33. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 640: 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/640/1/012080
34. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expansive soil. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018.11(17): 521. DOI:10.1007/s12517-018-3864-0
35. Oriola F.O.P., Moses G., Sani J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. *Indian Journal of Engineering*. 2017. 14(37): 215-226.
36. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*. 2013. 4.: 1416-1424. DOI:10.4236/ijg.2013.410139
37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE *Journal of Civil Engineering*. 2012. 16(6): 943–949. DOI:10.1007/s12205-012-1388-9
38. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. *Indian Geotechnical Journal*. 2014. 45(2): 217–224. DOI:10.1007/s40098-014-0127-1.
39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. 43: 5193–5202. DOI:10.1007/s13369-017-3033-x
40. Colt, O.E., Razval, C. Geosynthetic reinforcement for base / subbase courses of road structures. *International Symposium: Highway and Bridge Engineering 2014*, 1-7.
41. Dong, Y.L., Han, J., Bai X.H. Numerical analysis of tensile behavior of geogrids with rectangular and triangular apertures. *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. 29(2): 83–91. DOI:10.1016/j.geotexmem.2010.10.007
42. Giroud, J.P., Han, J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: I. Development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130(8): 775–786. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775)
43. Giroud, J.P., Han, J: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: II. Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130 (8): 787–797. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(787)
44. Han, J., Leshchinsky, D: Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes* 2010. 28(3): 262–267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012
45. Han, J., Jiang, Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013. 5(5): 517–529. DOI:10.3724/SP.J.1226.2013.00517
46. Han, J. et al. Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. 23(11): 1525–1534. (2011). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286
47. Chen, X., Chen, L., Zhang, J. Permanent Deformation Behavior of Coarse Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. vol 66. DOI: 10.1007/978-981-15-2349-6_16
48. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. 16(7): 587–601. DOI:10.1080/10298436.2014.943209
49. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*. 2017. 18(3): 236-246. DOI:10.1080/10298436.2015.1065991
50. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering*. 2016. 143: 300–307. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.038
51. Karaulov, A.M., Korolev, K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Freestanding Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. 54(4): 211–215. DOI:10.1007/s11204-017-9460-6
52. Karaulov, A.M., Korolev, K.V.: On the determination of the maximum earth pressure on retaining walls *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. 52(4): 175–180. DOI:10.1007/s11204-015-9325-9

53. Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N.: Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. RoadexIII Northern Periphery. 2008.
54. Dawson, A.R., et al: Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2007. 1989(1): 165–172. DOI:10.3141/1989-19
55. Chandak P.G., et al: Performance Evaluation of Low Volume Rural Roads- A State-of-the-Art Review. In: Frikha W., Kawamura S., Liao WC. (eds) New Developments in Soil Characterization and Soil Stability. GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. 43–57 (2019). DOI:10.1007/978-3-319-95756-2_5
56. Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Метод расчета остаточных деформаций, применяемых в основаниях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2019. № 4(68). С. 456–471. DOI:10.26518/2071-7296-2019-4-456-471
57. Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л. Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления // Вестник СибАДИ. 2019. № 6(70). С. 718–745.

REFERENCES

1. Kettle R.J., McCabe E.Y. Mechanical Stabilization for the Control of Frost Heave. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2011. 12(4), p. 899-905. DOI:10.1139/I85-102.
2. Mahedi M., Cetin B., White D.J. (2021). Closure to “Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison”. *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 33(9):07021013. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003868.
3. Coban H.S., et al. (2022) Effects of Using Recycled Aggregates and Large Stones for Base and Subbase Layers on Modulus Properties of Pavements. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) *Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol 164. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-77230-7_28.
4. Han J., Leshchinsky D. Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010. Vol. 28(3). Pp. 262-267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012.
5. Tang X.C., Chehab G.R., Palomino A. Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008. Vol. 9(6). Pp. 413-429. DOI:10.1080/10298430802279827.
6. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Primenenie zoloshlakovyh smesey dlya vertikal'nyh planirovok i stroitel'stva gorodskih dorog [The use of ash and slag mixtures for vertical planning and construction of urban roads] // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2015, 1(1): 24-31. (in Russian)
7. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnyh harakteristik zoloshlakovoy smesi *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016, 52(6): 72-79. DOI:10.26518/2071-7296-2016-6(52)-72-79. (in Russian)
8. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformatsionnyh harakteristik zoloshlakovyh smesey // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 53(1): 103-110. DOI:10.26518/2071-7296-2017-1(53)-103-110. (in Russian)
9. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopostavlenie deformatsionnyh parametrov zoloshlakovoy smesi, poluchennyh v laboratornyh i naturnykh usloviyah // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227. DOI:10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227. (in Russian)
10. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 74(6): 3–16. DOI:10.18720/MCE.74.1. (in Russian)
11. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.YA. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya ustrojstva monolitnyh sloev dorozhnyh odezhd metodom holodnogo resajklinga [Investigation of the effectiveness of the use of whitewash sludge for the device of monolithic layers of road clothes by cold recycling] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020, 17(6): 764-776. DOI:10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776. (in Russian)
12. Lytkin A.A. Vliyanie povtornogo uplotneniya i transportnyh nagruzok na karakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyah dorozhnyh odezhd [The effect of re-compaction and transport loads on the character of hardening of whitewash sludge in layers of road clothes] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 55(3): 125-132. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132 (in Russian)
13. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 2020. 992, 79–85. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79 (in Russian)
14. Schneider V.A., Levashov G.M., Sirotyuk V.V. The definition of strength required geosynthetics for erosion control nepotoplyaemyj protection slope subgrade. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 1(47):72-80. (in Russian)
15. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opredelenie deformatsionnyh harakteristik shchebenochno-peschano-go osnovaniya, armirovannogo stal'noj geosetkoj *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013, 32(4): 57-61. (in Russian)
16. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoj odezhd [Experimental and theoretical studies of reinforced pavement foundation] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2015, 44(4): 80-86. DOI:10.26518/2071-7296-2015-4(44)-80-86(in Russian)
17. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 94(2): 21–30. DOI: 10.18720/MCE.94.3
18. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on

- a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 662:164-167. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.662.164
19. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 587-589:1137-1140. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1137
 20. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. Empirical conditions of plasticity in calculations of the subgrade by shift. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019. 10(85): 7-20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1(in Russian)
 21. Kalinin A.L. Application of modified yield criteria for calculation of safe pressures on the subgrade soil. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. 39(4): 35–45. (rus). DOI: 10.5862/MCE.39.4.
 22. Kuzin N.V., Aleksandrov A.S. Ob izmenenii napryazheniya vertikal'nogo szhatiya v dorozhnykh konstrukciyah *Izvestiya orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: stroitel'stvo i transport*. 2007, 16(4): 221-225. (in Russian)
 23. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2): 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7(in Russian)
 24. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021. 58(1): 2–7. DOI:10.1007/s11204-021-09700-8(in Russian)
 25. Dolgikh G.V. Raschet gruntov zemlyanogo polotna po kriteriyu bezopasnykh davlenij *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. 34(6): 43-49. (in Russian)
 26. Dolgikh G.V. Opreделение pervoj kriticheskoy nagruzki pri raschete gruntov zemlyanogo polotna po soprotivleniyu sdvigu // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2016. 3 (46): 90-97. (in Russian)
 27. Aleksandrova N.P., Semenova T.V., Dolgikh G.V. Sovershenstvovanie modelej rascheta glavnnykh napryazhenij i deviatora v grunte zemlyanogo polotna [Improvement of models for calculating the main stresses and the deviator in the ground of the road-bed]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2014. 2 (36): 49-54. (in Russian)
 28. Aleksandrov A.S. Issledovanie plasticheskogo deformirovaniya diskretnykh materialov pri vozdeystvii ciklicheskih nagruzok i opredelenie parametrov matematicheskikh modelej [Investigation of plastic deformation of discrete materials under the influence of cyclic loads and determination of parameters of mathematical models] *Stroitel'nye materialy*. 2016. 10: 27-32. (in Russian)
 29. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. *Advanced Materials Research*. 2014. 1020: 31–36. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.31
 30. Iliina, O.N., Ilin, I.B. Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 92(8): 115–126. DOI: 10.18720/MCE.92.10
 31. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753, pp. 1-5. DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032006
 32. Rudgalskiy, D. et al. Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1614: 1-9. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012004
 33. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 640: 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/640/1/012080
 34. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expansive soil. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. 11(17): 521. DOI:10.1007/s12517-018-3864-0
 35. Oriola F.O.P., Moses G., Sani J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. *Indian Journal of Engineering*. 2017. 14(37): 215-226.
 36. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*. 2013. 4: 1416-1424. DOI:10.4236/ijg.2013.410139
 37. Naeni, S.A, Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2012. 16(6): 943–949. DOI:10.1007/s12205-012-1388-9
 38. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. *Indian Geotechnical Journal*. 2014. 45(2): 217–224. DOI:10.1007/s40098-014-0127-1.
 39. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. 43: 5193–5202. DOI:10.1007/s13369-017-3033-x
 40. Colt, O.E., Razval, C. Geosynthetic reinforcement for base / subbase courses of road structures. *International Symposium: Highway and Bridge Engineering 2014*, 1-7.
 41. Dong, Y.L., Han, J., Bai X.H. Numerical analysis of tensile behavior of geogrids with rectangular and triangular apertures. *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. 29(2): 83–91. DOI:10.1016/j.geotextmem.2010.10.007
 42. Giroud, J.P., Han, J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: I. Development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130(8): 775-786. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775)
 43. Giroud, J.P., Han, J: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: II. Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130 (8): 787-797. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(787)
 44. Han, J., Leshchinsky, D: Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geo-*

textiles and Geomembranes 2010. 28(3): 262–267. DOI:10.1016/j.geotextmem.2009.09.012

45. Han, J., Jiang, Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013. 5(5): 517–529. DOI:10.3724/SP.J.1226.2013.00517

46. Han, J. et al. Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. 23(11): 1525–1534. (2011). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286

47. Chen, X., Chen, L., Zhang, J. Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. 66. DOI: 10.1007/978-981-15-2349-6_16

48. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behavior of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. 16(7): 587–601. DOI:10.1080/10298436.2014.943209

49. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*. 2017. 18(3): 236-246. DOI:10.1080/10298436.2015.1065991

50. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering*. 2016. 143: 300–307. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.038

51. Karaulov, A.M., Korolev, K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Free-standing Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. 54(4): 211–215. DOI:10.1007/s11204-017-9460-6

52. Karaulov, A.M., Korolev, K.V.: On the determination of the maximum earth pressure on retaining walls *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. 52(4):175–180. DOI:10.1007/s11204-015-9325-9

53. Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N.: Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. *RoadexIII Northern Periphery*. 2008.

54. Dawson, A.R., et al: Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2007. 1989(1): 165–172. DOI:10.3141/1989-19

55. Chandak P.G., et al: Performance Evaluation of Low Volume Rural Roads- A State-of-the-Art Review. In: Frikha W., Kawamura S., Liao WC. (eds) *New Developments in Soil Characterization and Soil Stability*. *GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. 43–57 (2019). DOI:10.1007/978-3-319-95756-2_5

56. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Metod rascheta ostatochnyh deformacij, primenyayemyh v osnovaniyah dorozhnyh odezhd // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* ,

2019, 68(4): 456–471. DOI:10.26518/2071-7296-2019-4-456-471. (in Russian)

57. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Analiz prichin koleeobrazovaniya na pokrytyyah nezhestkih dorozhnyh odezhd i rekomendacii po umen'sheniyu etogo yavleniya // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 70(6): 718–745. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пролыгин А.С. Произвел изготовление образцов, выполнил экспериментальные испытания и математическое моделирование.

Долгих Г.В. Произвел постановку задачи, разработку методики выполнения экспериментальных работ, редактирование текста статьи.

Калинин А.Л. Принял в подготовке образцов к испытанию и в их испытании образцов. Редактировал текст статьи.

Александрова Н.П. Произвела написание текста статьи, статистическую обработку данных.

COAUTHORS ' CONTRIBUTION

Aleksandr S. Prolygin produced samples, performed experimental tests and mathematical modelling.

Gennadii V. Dolgikh formulated the problem, developed a methodology for performing experimental work, and edited the text of the article.

Aleksandr L. Kalinin participated in the preparation of samples for testing and in their testing of samples, edited the text of the article.

Natalia P. Alexandrova wrote the text of the article, performed statistical processing of the experimental data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57222243670 .

Долгих Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57199391542).

Калинин Александр Львович – ст. преп. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» .

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Prolygin, Postgraduate student of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57222243670,

Gennadii V. Dolgikh, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57199391542.

Aleksandr L. Kalinin, Senior teacher of the Road Construction and Maintenance Department.

Natalia P. Alexandrova, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57191525817.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1. УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов 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 упоминании 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 подрисовочной 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 – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.