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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

Том 16, № 6. 2019. Сквозной номер выпуска – 70
(Vol. 16, no. 6. 2019. Continuous issue – 70)

Омск – 2019

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»
ВЕСТНИК СибАДИ / The Russian Automobile and Highway Industry Journal
Научный рецензируемый журнал. Издается с 2004 г. Выходит 6 раз в год

Том 16, № 6. 2019.
Сквозной номер выпуска – 70
(Vol. 16, no. 6. 2019. Continuous issue – 70)

Главный редактор **Жигадло А.П.,** д-р пед. наук, канд. техн. наук, доц., член-кор. АВН, ректор ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Editor-in-Chief, Alexandr P. Zhigadlo, Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of Academy of Military Science, Rector of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Транспортное, горное и строительное машиностроение

Галдин Н.С., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Корытов М.С., д-р техн. наук, доц., проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Транспорт

Певнев Н.Г., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Витвицкий Е.Е., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Строительство и архитектура

Сиротюк В.В., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Чулкова И.Л., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

EDITORIAL TEAM

Transport, mining and mechanical engineering

Nikolai S. Galdin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Mikhail S. Korytov, Doctor of Science, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Transport

Nikolai G. Pevnev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Evgeniy E. Vitvitskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Construction and architecture

Viktor V. Sirotyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Irina L. Chulkova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Корчагин П.А., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Щербаков В.С., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Винников Ю.Л., д-р техн. наук, проф., Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина

Горынин Г.Л., д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРЫ», г. Сургут, Россия

Данилов Б.Б., д-р техн. наук, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

Жусупбеков А.Ж., д-р техн. наук, проф., член-кор. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.

Макеев С.А., д-р техн. проф. наук ФГБОУ ВО «СибАДИ» г. Омск, Россия

Мещеряков В.А., д-техн. наук, доц., проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Мочалин С.М., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Немировский Ю.В., д-р физ.-мат. наук, проф. Федеральне государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Перегуд Я.А. д-р экон. наук, проя. Высшая школа экономики в Варшаве (SGH), г. Варшава, Польша

Подшивалов В.П., д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Пономарев А.Б., д-р техн. наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

Хмара Л.А., д-р техн. наук, проф., Приднепровская государственная академия Строительства и Архитектуры, г. Днепропетровск, Украина

Эдвин Козневски, д-р техн. наук, проф., г. Белосток, Польша

Боброва Т.В., д-р техн. наук, проф.,ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Леонович С.Н., д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

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

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

EDITORIAL BOARD

Pavel A. Korchagin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Vitaliy V. Shcherbakov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Yuriy L. Vinnikov, Doctor of Technical Sciences, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, Poltava, Ukraine

Gleb L. Gorynin, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor of the «SurGUKMAO-Yugra», Surgut, Russia

Boris B. Danilov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mining and Construction Geotechnics, Mining Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Askar Zh. Zhusupbekov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, ENU named aft eLr. N. Gumilev, Astana, Kazakhstan

Sergey A. Makeev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Vitaliy A. Meshcheryakov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Sergey M. Mochalin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Yuriy V. Nemirovsky, Doctor of Phys.-Math. Sciences, 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

Yana A. Peregood, Doctor of Economics, Professor, Higher School of Economics in Warsaw, Warsaw, Poland

Vladimir P. Podshivalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus

Andrey B. Ponomarev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Technical University, Perm, Russia

Leonid A. Khmara, Doctor of Technical Sciences, Professor, Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture, Dnepropetrovsk, UkraineEdwin Koźniewski, Doctor of Science, Professor, Bialystok, Poland

Edwin Koźniewski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bialystok, Poland

Tatiana V. Bobrova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Якунин Н.Н., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

Ефименко В.Н., д-р техн. наук, проф., Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Якунина Н.В., д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

Корнеев С.В., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия

Боровик В.С., д-р техн. наук, проф., Волгоградский научно-технический центр, г. Волгоград, Россия

Коротаев Д.Н., д-р техн. наук, доц., проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Лесовик В.С., д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, БГТУ им. Шухова, г. Белгород, Россия

Савельев С.В., д-р техн. наук, доц., проф. ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Корягин М.Е., д-р техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск, Россия

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

Кондратенко А.С., канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)», ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Маткеримов Т.Ы., д-р техн. наук, проф., КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Киргизская Республика

Курганов В.М., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь, Россия

Матвеев С.А., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

Зырянов В. В. д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону.

Трофименко Ю.В. д-р техн.наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) г. Москва, Россия

Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф., Директор Политехнического института имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева» г. Орел, Россия

Чекардовский М. Н. д-р техн. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия

Вацлав Скала, профессор University of West Bohemia, г. Пльзень, Чехия

Хомченко В.Г., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия

Sergey N. Leonovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Gali S. Gumarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Member-cor. of the Russian Academy of Natural History, Eurasian National University named after L.N. Gumilev, Astana, Republic of Kazakhstan

Zhirgalbek S. Sharshembiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin, Bishkek, Kyrgyz Republic

Nikolai N. Yakunin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

Vladimir N. Efimenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

Natalia V. Yakunina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

Sergey V. Korneev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Vitaliy S. Borovik, Doctor of Technical Sciences, Professor, Volgograd Science and Technology Center, Volgograd, Russia

Dmitriy N. Korotaev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Valeriy S. Lesovik, Doctor of Technical Sciences, Professor, Member-cor. of RAASN, BSTU named after Shukhov, Belgorod, Russia

Sergey V. Saveliev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Mark E. Koryagin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Vladimir I. Rassokha, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

Andrey S. Kondratenko, Candidate of Technical Sciences, Siberian State University of Railway Transport (SGUPS), IGD SB RAS, Novosibirsk, Russia

Taalaibek I. Matkerimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, KSTU named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyz Republic

Valeriy M. Kurganov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tver State University, Tver, Russia

Sergey A. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Vladimir V. Zyryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Don State Technical University, Rostov-na-Donu

Yuriy V. Trofimenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Moscow, Russia

Alexandr N. Novikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel , Russia

Mikhail N. Chekardovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State budget institution of higher education «Tyumen industrial University», Tyumen, Russia

Václav Skala, Professor of University of West Bohemia, Plsen, Czech Republic

Vasiliy G. Khomchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Адрес издателя: 644080, г. Омск, просп. Мира. 5. Тел. +7 (3812) 65-88-30;
режим доступа: vestnik.sibadi.org; e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

Учредитель ФГБОУ ВО «СибАДИ». Адрес учредителя: 644080, г. Омск, просп. Мира. 5. Россия.

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 года.

Научный рецензируемый журнал Вестник СибАДИ / The Russian Automobile and Highway Industry Journal 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 2009 года представлен в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU и включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Входит в международный каталог Ulrich's International Periodicals Directory. Подписной индекс 66000 в каталоге (АО Агентства "РОСПЕЧАТЬ). С 2017 г. всем номерам и статьям журнала присваиваются идентификаторы цифровых объектов (DOI), данные о которых размещены в электронной версии на сайте vestnik.sibadi.org. Редакционный блок осуществляет экспертную оценку, рецензирование и проверку статей на плагиат.

Подписано в печать 25.12.2019. Дата выхода в свет 30.12.2019. Формат 60×84 ⅛. Гарнитура Arial. Печать оперативная.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии ИПК ФГБОУ ВО «СибАДИ» 644080, г. Омск, пр. Мира, 5.

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2019

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Николаев В.А.
АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА **642**

Овсянников В.Е., Васильев В.И.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА РЕМОНТНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА **658**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

Агуреев И.Е., Юрченко Д.А.
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЗАГРУЗКЕ УДС ГОРОДА С УЧЕТОМ ДАННЫХ О ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ПРИДОМОВЫХ СТОЯНОК АВТОМОБИЛЕЙ **670**

Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г.
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРОГРАММЫ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СЕТЕЙ И ПОТОКА НАСЫЩЕНИЯ **680**

Сафронов К.Э., Сафронов Э.А.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОМСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ **692**

Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С., Федотов А.И., Алексеев А.В.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САЙЛЕНТБЛОКА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГУКА И СЕН-ВЕНАНА **706**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л.
АНАЛИЗ ПРИЧИН КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ **718**

Лунёв А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОПЛИВНОГО ШЛАКА ТЭЦ **746**

Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е. А., Рахуба Л.Ф.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЖАТЫХ ПОЛКАХ АРОЧНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ **758**

Пименов А.Т., Прибылов В.С.
ПРИМЕНЕНИЕ ШЛАКОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ **766**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Nikolayev V.A.
ANALYSIS OF THE CYCLICAL GROUND CUTTING **643**

Ovsyannikov V.E., Vasilyev V.I.
RESTORATION OF THE CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES' DETAILS FROM GREY CAST IRON: IMPROVEMENT OF THE REPAIR DIMENSIONS' METHOD EFFICIENCY **659**

PART II. TRANSPORT

Agureev I.E., Yurchenko D.A.
FUNCTIONING OF THE CAR PARKING PLACES NEAR HOUSES: FORMULATION OF THE PROBLEM OF THE ROAD CITY NETWORK **671**

Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G.
PROGRAM OF LIGHT-FORMAT REGULATION ON THE BASIS OF CONTROLLED NETWORKS AND THE SATURATIONS' FLOW: BASIC PRINCIPLES OF CALCULATION **681**

Safronov K.E., Safronov E.A.
TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE OMSK AGGLOMERATION: EVALUATION OF THE COMPLEX DEVELOPMENT OPTIONS **693**

Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S., Fedotov A.I., Alekseev A.V.
MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING PROCESS OF A RUBBER BUSHING ON THE HOOKE AND SAINT-VENANT ELEMENTS' BASIS **707**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L.
RUTTING ON THE SURFACES OF NON-RIGID ROAD PAVEMENTS: ANALYSIS OF THE CAUSES AND RECOMMENDATIONS FOR REDUCING **719**

Lunev A.A.
MECHANICAL STRENGHT'S RESEARCH OF THE THERMAL POWER STATION'S SLAG **747**

Makeev S.A., Gorkovenko V.A., Seitov E.A., Rahuba L.F.
COMPRESSED FLANGES OF ARCHED STEEL THIN-WALLED COLD-ROLLED PROFILED SHEETS: DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES **759**

Pimenov A.T., Pribylov V.S.
APPLICATION OF SLAG FILLERS IN THE ASPHALT CONCRETE COMPOSITION FOR INCREASING THE ROAD COATING'S DURABILITY **767**

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

РАЗДЕЛ I.
ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 625.08
DOI:https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657

АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО ЯТУ,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Для циклического резания грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог нужны роторные рыхлители, поэтому общей целью исследования является теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров роторного рыхлителя. Используя синтезный метод, можно получить лишь ориентировочные результаты. Для более точного расчёта параметров резания грунта необходимо произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.*
Методика исследования. *На основании намеченных путей уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом разработана методика расчёта: силы резания грунта носком рабочего органа; силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом; силы трения боковых поверхностей рабочего органа о грунт в процессе оборота ротора.*
Результаты. *Используя разработанную методику определения параметров циклического резания грунта, вычислены их конкретные значения в процессе оборота ротора, исходя из принятых исходных данных. На основе расчётов построены и аппроксимированы графики зависимостей параметров резания грунта от угла поворота ротора. В частности, получены зависимости: силы, необходимой для сдвига грунта активным рабочим органом; массы смещаемого грунта; ускорения смещаемого грунта; силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту; силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина; силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221.*
Заключение. *На основе анализа взаимодействия рабочих органов с грунтом разработана методика расчёта сил, возникающих при резании грунта, и вычислены их конкретные значения. Зная эти силы и точки их приложений, несложно определить необходимый вращающий момент и мощность привода ротора, если все рабочие органы осуществляют зажатое резание.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *подстилающий слой автодорог, роторный рыхлитель, циклическое резание грунта, зажатое резание грунта, активный рабочий орган, анализ взаимодействия с грунтом, сила резания носком, первичный сдвиг грунта, смещение грунта, трение о грунт.*

Поступила 07.09.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта. *Вестник СибАДИ.* 2019;16(6): 642–657. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657

© Николаев В.А.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI:https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657

ANALYSIS OF THE CYCLICAL GROUND CUTTING

Vladimir A. Nikolayev
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. *Rotary rippers are needed for cyclical cutting of the ground when the underlying layer and slopes of the roads are formed. Therefore, the general purpose of the research is the theoretical justification of the design and mode of rotary ripper's parameters. Using the synthesis method, researches get only indicative results. In order to calculate the parameters of ground cutting, it is necessary to analyze the interaction of working bodies with the ground.*
Materials and methods. *Based on the planned ways to reduce the cost of energy for cyclical cutting of the ground, the author developed the calculation method of the working body: the force of cutting the ground with the toe of the working body; the force necessary for the primary shift of the ground by the front surface of the working body; the total force of ground displacement by an active working body; the friction of the side surfaces of the working body on the ground during the rotation.*
Results. *The author calculated the specific values in the process of rotation by using the developed method of determining the parameters of the cyclic ground cutting and basing on the accepted data. Moreover, the author constructed and approximated the graphs' dependencies of ground cutting parameters of the rotor angle. In particular, there were dependencies: the force required to shift the ground by an active working body, the mass of the displaced ground, the acceleration of the displaced ground, the force needed to accelerate the displaced soil, the force of the ground's impact on the side surface of the displaced ground wedge, the friction force displaced by the active working body of the ground wedge on the array of soil, the total force of the displacement of the ground by the active working body from the angle of the rotor when moving the unit at various transmissions II range of tractor HTP-17221.*
Discussion and conclusions. *The method of calculating the forces of the ground cutting and calculating their specific values helps to determine the required rotational moment and power of the rotor drive.*

KEYWORDS: *underlying layer of roads, rotary ripper, cyclical cutting of the ground, clamped cutting of the ground, active working body, ground interaction analysis, cutting tool force, primary shift of the ground, ground displacement, ground friction.*

Submitted 07.09.2019, revised 17.12.2019.
The author has read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Nikolayev Vladimir A. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 642–657 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657

© Nikolayev V.A.

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) выявлены частные силы воздействия рабочего органа на грунт при циклическом резании;

2) вычислена сила резания грунта носком рабочего органа;

3) определено изменение силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа от угла поворота ротора;

4) выявлено изменение суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом при повороте ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Доля затрат на формирование подстилающего слоя в общих затратах на строительство очень велика. Прежде чем сформировать подстилающий слой нужного профиля следует удалить почву, то есть верхний слой грунта, насыщенный органическими остатками. Для его удаления применяют бульдозеры, экскаваторы, скреперы и другие циклические технические средства общего назначения. При их использовании происходит смешение почвы с грунтом, предназначенным для создания подстилающего слоя, что снижает качество автодороги. Органические остатки, содержащиеся в почве, которые остаются в подстилающем слое, с течением времени разлагаются. В местах их разложения дорога оседает, становится неровной, образуются выбоины. Чтобы уменьшить этот недостаток, удаляют с полосы отвода дороги не только почву, но и часть грунта под ней, что существенно увеличивает затраты на строительство. При этом почва с полосы отвода дороги как ценнейший продукт многолетней деятельности природных факторов обычно пропадает, не используется в сельском хозяйстве.

Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата формирования подстилающего слоя непрерывного действия. Одним из устройств агрегата должен являться рыхлитель, совершающий циклическое резание верхнего слоя грунта, разрушающий его целостность для последующего удаления с полосы отвода автодороги и использования в сельском хозяйстве. Рыхлитель, совершающий циклическое резание грунта, можно использовать не только для разрушения слоя почвы, но и для разрыхления грунта с целью формирования откосов дорог.

При формировании подстилающего слоя и откосов автодорог предпочтительным является разрыхление грунта путём его циклического резания активными рабочими органами. Резание грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог имеет специфику, связанную с армированностью поверхностного слоя корнями. Для циклического резания грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог нужны роторные рыхлители, с одной стороны, надёжные, с другой стороны, с умеренными затратами энергии. Общей целью исследования является теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров роторного рыхлителя для формирования подстилающего слоя и откосов автодорог. В рамках общей цели необходимо провести теоретическое исследование циклического резания грунта.

Для теоретической оценки затрат энергии на разработку грунта, в том числе талого грунта, обычно используют синтезный метод[1,2,3,4,5,6,7,8,9] [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Однако оценка затрат энергии на разработку грунта активными рабочими органами син-

[1] Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М. : Изд. ЛКИ, 2013. 224 с.

[2] Зыков Б.И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль : Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.

[3] Ветров Ю.А. Разрушение прочных грунтов. Киев: Изд. «Будивельник», 1973. 350 с.

[4] Бьюи Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения (пер. с английского). М. : Изд. ФИЗМАТЛИТ, 2011. 412 с.

[5] Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике (пер. с английского). М. : Изд. ЛКИ, 2016. 240 с.

[6] Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М. : Машиностроение, 1971. 357 с.

[7] Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М. : Машиностроение, 1983. 143 с.

[8] Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 326 с.

[9] Баловнев В.И. Моделирование и прогнозирование процессов взаимодействия машин с многофазными средами: взаимодействие рабочих органов строительных, дорожных и коммунальных машин с грунтом и другими материалами. М. : МАДИ, 2000. 61 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

тезным методом [25, 26] даёт лишь ориентировочные результаты. Для более точного расчёта параметров резания грунта необходимо произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.

В статье [26] намечены пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом. В частности, отсутствие крепежа для закрепления активных рабочих органов на вале ротора, применение двуединого долотообразного рабочего органа, применение рациональной формы долот, рациональное размещение оптимального количества долот на роторе, ограничение глубины разработки грунта и угловой скорости вала ротора. Рассмотрим внедрение активного рабочего органа в грунт (рисунок 1, а) и его траекторию в грунте при расчётной ограниченной глубине разработки 160 мм.

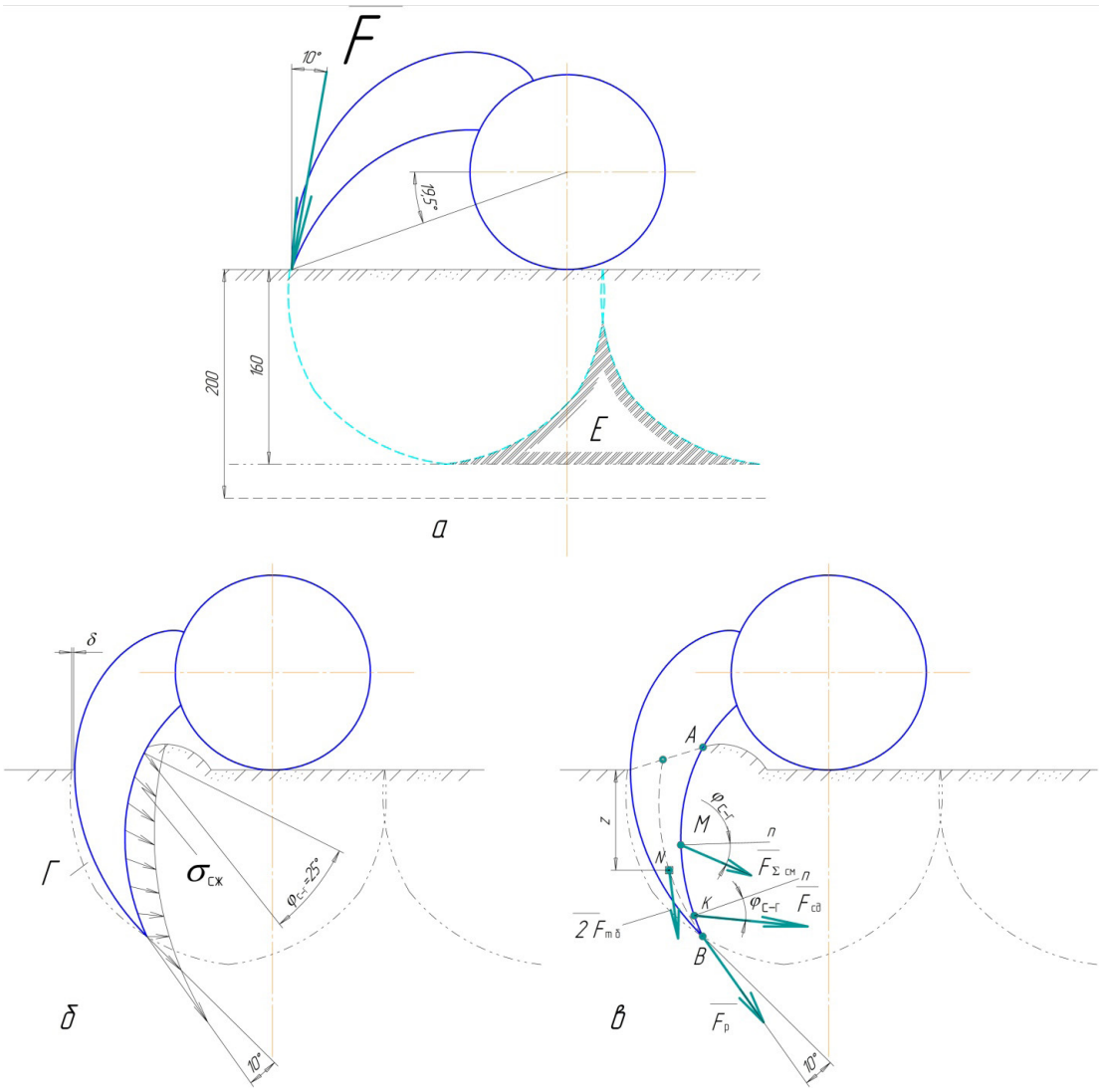


Рисунок 1 – Воздействие активного рабочего органа на грунт силой F при зажатом резании: а – момент входа в грунт и траектория, Е – остающаяся перемычка; б – распределённая сила, создающая напряжение сжатия, Г – свободное пространство; в – сосредоточенные силы: $F_р$ – сила резания, $F_{сд}$ – сила первичного сдвига грунта, $F_{\Sigma см}$ – сила, необходимая для смещения сдвинутого грунта, $2F_{mб}$ – сила трения боковых плоскостей активного рабочего органа о грунт; z – расстояние от поверхности грунта до точки её приложения; $\varphi_{с-г}$ – угол трения стали о грунт

Figure 1 – Exposure to the ground by Force F when cut is clamped: a – the moment of entry into the ground and the trajectory, E – the remaining jumper; б – distributed force, creating a compression voltage, G – free space; C – Concentrated forces: F_r – cutting force, F_{sd} – the force of the primary shift of the ground, F_{cm} – the force necessary to shift the shifted ground, $2F_{q(t\,b)}$ – the force of friction of the side planes of the active working body on the ground; z – the distance from the ground surface to the point of its application; φ_{c-e} · angle of friction has become about the ground

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Из рисунка 1, а видно, что в момент входа в грунт носка рабочего органа сила воздействия активного рабочего органа на грунт направлена по биссектрисе угла заточки. Если геометрические параметры носка активного рабочего органа соответствуют параметрам, рассчитанным в [26], он врезается в грунт так, что касательная к его задней поверхности направлена почти вертикально. Активный рабочий орган углубляется, сдвигая грунт передней поверхностью. При дальнейшем продвижении (рисунок 1, б) задняя поверхность активного рабочего органа входит в почву с небольшим зазором δ, исключающим её трение о грунт. При минимально необходимой угловой скорости вала ротора между рассматриваемым проходом и проходом предыдущего активного рабочего органа остаётся неразработанный участок грунта, перемычка *E* (см. рисунок 1, а). Поэтому перечисленных конструктивных и режимных мер уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом недостаточно. Чтобы эти перемычки срезать, сделать ровной поверхность подстилающего слоя автодороги, установим дополнительно пассивные рабочие органы с расчётной глубиной хода 200 мм. Путём анализа взаимодействия рабочих органов с грунтом вычислим параметры роторного рыхлителя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Из построений определим общую площадь, описываемую траекторией активного рабочего органа в грунте, и путь его носка в грунте. Приложенная к активному рабочему органу сила создаёт поверхностные распределённые силы (см. рисунок 1, б), порождающие в грунте напряжения сжатия. Заменим распределённые силы воздействия активного рабочего органа на грунт сосредоточенными силами (рисунок 1, *в*).

Сила F_p резания приложена к носку В активного рабочего органа. Она направлена по биссектрисе угла заточки. Сила $F_{сд}$ совершает первичный сдвиг грунта, приложена к некоторой точке *K* на передней поверхности активного рабочего органа, положение которой определим из дальнейших построений. Она отклонена от нормали n к передней поверхности активного рабочего органа в точке *K* на угол трения грунта о сталь $\varphi_{с-г}$. Сила $F_{\Sigma см}$ смещает сдвинутый грунт, приложена к некоторой точке *M* передней поверхности и также отклонена от нормали к передней поверхности активного рабочего органа в точке *M* на угол трения грунта о сталь.

Силы трения боковых плоскостей приложены к точкам *N* участков плоскостей активного рабочего органа, погружённых в грунт. На плоском рисунке эти силы можно изобразить одним вектором $2F_{mб}$, поскольку они равны при зажатом резании, то есть резании, когда лезвие зажато грунтом с обеих сторон [25]. Точку *N* приложения силы трения расположим на глубине 2/3 заглубления активного рабочего органа, а направление в каждом рассматриваемом положении будем определять путём перемещения этой точки в предыдущее положение. С достаточной точностью можно заменить криволинейную траекторию точки *N,* при перемещении из предыдущего положения в рассматриваемое положение, на прямолинейную траекторию ввиду малой величины используемого шага вычислений.

Чтобы определить силу резания расчётным путём, представим, что активный рабочий орган разделяет грунт микроотрывами [25], а один микроотрыв грунта при внедрении активного рабочего органа происходит на пути 18 мм. Площадь отрыва S_o равна произведению пути микроотрыва l_o на удвоенную ширину $2b$ активного рабочего органа с учётом распространения трещины вглубь массива грунта

$$S_o = 2bl_o. \quad (1)$$

Приняв предел прочности грунта на растяжение , определим силу резания

$$F_p = \sigma_p^в S_o. \quad (2)$$

Активный рабочий орган сдвигает грунт по двум боковым плоскостям и нижней плоскости. Сила сдвига

$$F_{сд} = \tau_{сд}^в S_{сд}, \quad (3)$$

где $\tau_{сд}^в$ – предел прочности грунта на сдвиг; $S_{сд}$ – площадь сдвигаемого грунта.

Сила сдвига грунта при зажатом резании активным рабочим органом изменяется. Для определения её текущих значений следует выполнить построения, задав шаг вычислений, соответствующий углу поворота вала ротора 11,25°. На рисунке 2, б активный рабочий орган изображён в положении 2.

Сделаем несколько допущений:

- свойства грунта в пределах зоны резания одинаковые, без учёта включений;

- участок сдвига грунта сверху и снизу на рисунке 2 ограничен элементарными векторами, отклонёнными в соответствующих точ-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

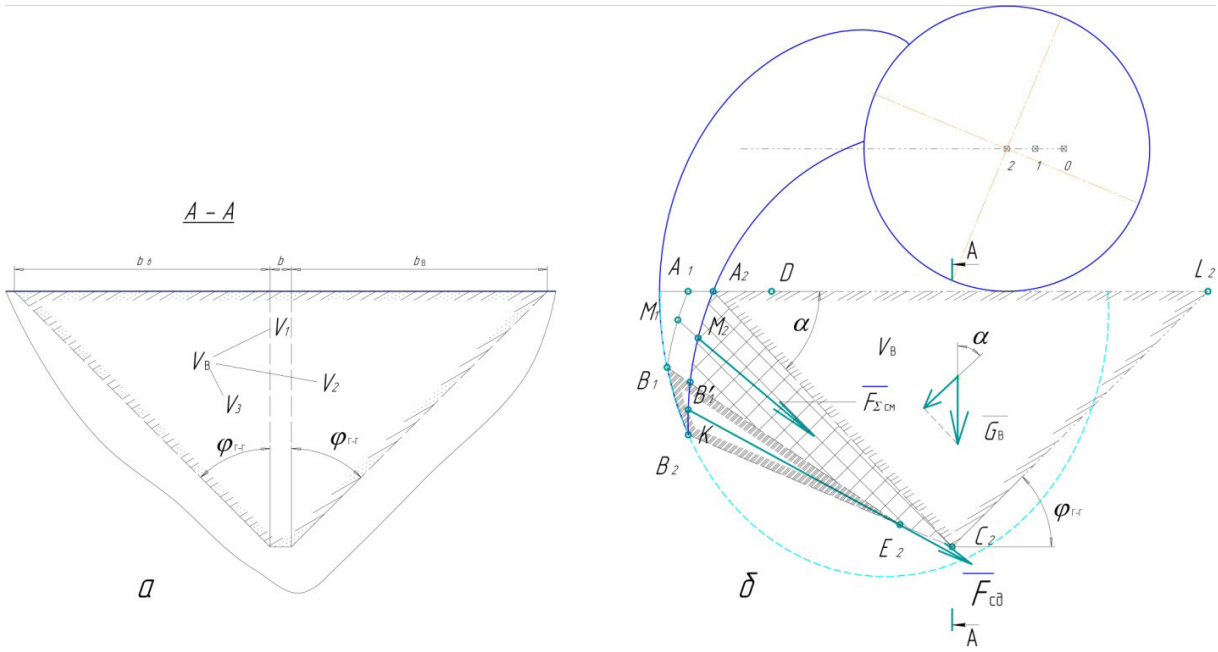


Рисунок 2 – Зона воздействия активного рабочего органа: а – разрез А – А: ,V_1, V_2, V_3 – составляющие объёма вытесняемого грунта $V_в$; $φ_{г-г}$ – угол трения грунта о грунт; b – ширина рабочего органа; б – сечение сдвигаемого $B_1B_2E_2$, смещаемого $A_2B'_1E_2C_2$ и вытесняемого $A_2C_2L_2$ грунта; $F_{сд}$ – сила первичного сдвига грунта, $F_{сд}$ – сила первичного сдвига грунта, $F_{Σсм}$ сила, необходимая для смещения; $G_в$ – сила тяжести вытесняемого грунта

Figure 2 – active working body impact area: a – cut A – A: V_1, V_2, V_3 – the volume of the displaced soil Vi_n; (g-g) – the angle of ground friction on the ground; b – the width of the working body; б – a cross-section of the shifted $B_1B_2E_2$, shifted A2B'1E2C2 and dislodged A2C2L2 soil; F_{sd}– is the force of the primary ground shift, F_{cm}– is the force needed for displacement; $G_в$ – gravity of the displaced soil

ках активного рабочего органа на углы трения грунта о сталь, а с боков – плоскостями, являющимися продолжением боковых плоскостей активного рабочего органа;

- сдвиг грунта происходит периодически, а между сдвигами идёт накопление в грунте упругого потенциала;

- период между сдвигами равен шагу вычислений.

Площадь сдвигаемого грунта в продольном сечении заключена в пределах треугольника $B_1B_2E_2$, в общем случае фигуры $B_{i-1}B_iE_i$. Кроме этого, сдвиг происходит по нижней плоскости, проецируемой в линию B_2E_2, в общем случае B_iE_i, поэтому

$$S_{сд} = 2S_б + S_н, \qquad (4)$$

где $S_б$ – площадь сечения сдвигаемого грунта в продольном сечении; $S_н$ – площадь сечения сдвигаемого грунта по нижней плоскости.

Определив в каждом положении силу сдвига, построим и аппроксимируем график зависимости $F_{сд} = f(\varphi)$, где φ – угол поворота ротора. Пример аппроксимации показан на рисунке 4.

Суммарная сила, необходимая для смещения грунта $F_{Σсм}$, включает две составляющие: усилие на преодоление силы инерции смещаемого участка грунта и усилие на преодоление силы трения между наружными частицами смещаемого участка грунта и остальным обрабатываемым массивом

$$F_{Σсм} = am_{см} + F_{т\,см} = am_{см} + f_{г-г}N, \qquad (5)$$

где a – ускорение смещаемого грунта; $m_{см}$ – масса смещаемого грунта; $f_{г-г}$ – коэффициент трения грунта о грунт; N – нормальное усилие воздействия массива грунта на смещаемый участок грунта.

Масса смещаемого грунта изменяется по мере поворота ротора. На сечении (см. рисунок 2, б) смещаемый грунт находится в пределах участка $A_2B'_1E_2C_2$. Ширину этого участка примем равной ширине активного рабочего органа. Точку M_2 приложения силы $F_{Σсм}$ и её направление определим по биссектрисе угла между A_2C_2 и B'_2E_2.

Аналитический способ определения силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, очень сложен. Даже если

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

выявить направление вектора ускорения некоторой средневзвешенной частицы участка в какой-либо момент времени, то уже в следующий момент изменится как размер смещаемого участка, так и направление и величина этого вектора. Поэтому воспользуемся графоаналитическим способом. Допустим, что при изменении положения активного рабочего органа вектор ускорения частиц участка смещаемого грунта направлен вдоль прямой $M_{i-1}M_i$ (на рисунке 2 M_1M_2). Выполнив построения и поместив данные в таблицу, можно построить зависимости ускорения смещаемого грунта и силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора.

Смещаемый участок грунта образует грунтовый клин, внедряющийся в массив грунта. На этот клин сверху воздействует вытесняемый им грунт, отображённый на сечении (см. рисунок 2, б) в треугольнике $A_2C_2L_2$. Отрезок C_2L_2 направим из точки C_2 под углом $\varphi_{г-г}$ трения грунта о грунт к горизонтали.

Объём $V_в$ вытесняемого грунта равен сумме объёмов грунта (см. рисунок 2, а), расположенного по ходу активного рабочего органа V_1, находящегося справа от активного рабочего органа V_2 и слева от активного рабочего органа V_3. Измерив площади аналогичных треугольников при различных положениях ротора, вычислим объём вытесняемого грунта, равный сумме объёма параллелепипеда и объёмов двух пирамид. Затем определим массу $m_в$ вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа. Занеся рассчитанные параметры в таблицу, построим зависимость массы грунта над почвенным клином от угла поворота ротора.

Силу $G_в$ тяжести грунта над грунтовым клином приложим в его центре масс (см. рисунок 2, б). Спроецировав силу тяжести на направление нормали к поверхности грунтового клина, получим нормальную силу $G_в \cos\alpha$, воздействующую на поверхность грунтового клина. Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила трения грунта о грунт по верхней части грунтового клина равна нормальной силе

$$F_{mв} = G_в \cos\alpha, \qquad (6)$$

Силу $F_б$ воздействия смещаемого грунта на боковую поверхность грунтового клина определим, исходя из силы $G_б$ тяжести грунта, воздействующего на боковую поверхность грунтового клина (рисунок 3):

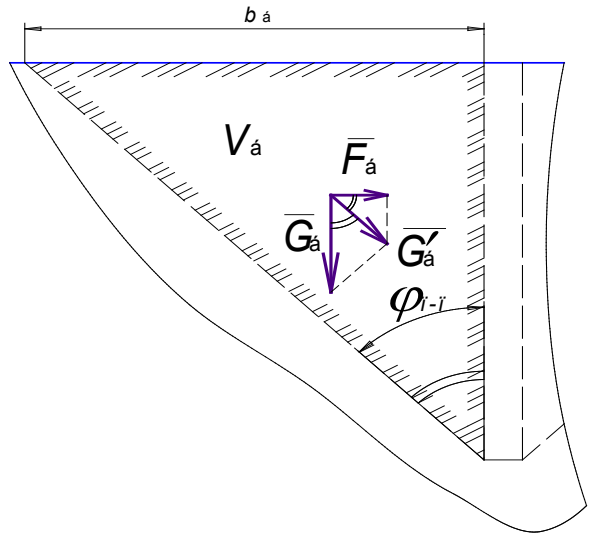


Рисунок 3 – Сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина

Figure 3 – Strength F_b of ground impact on the side surface of the displaced ground wedge

$$F_б = G_б cos^2\varphi_{г-г} = 0{,}5G_б = F_{mб}, \qquad (7)$$

где $F_{mб}$ – сила трения боковой поверхности грунтового клина об остальной грунт.

Объём грунта, воздействующего на грунтовый клин справа или слева от прохода активного рабочего органа, равен разности объёма пирамиды, основанием которой является фигура $A_2B'_1E_2C_2L_2$ на рисунке 2, и объёма пирамиды, с основанием $A_2C_2L_2$. Рассчитав в программе Microsoft Excel параметры на основе принятых данных, построим зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность грунтового клина от угла поворота ротора.

Нижняя поверхность грунтового клина воздействует на массив грунта суммарной силой $G_{\Sigma см}$ тяжести смещаемого грунта, расположенного выше $G_в$, сбоку грунтового клина $G_б$ и силой $G_{см}$ тяжести самого смещаемого грунтового клина

$$G_{\Sigma см} = G_в + G_б + G_{см}. \qquad (8)$$

Пренебрегая углами наклона нижней поверхности грунтового клина, поскольку они незначительно влияют на результат, полагаем, что нормальная реакция грунта, расположенного ниже грунтового клина, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта во всех положениях активного рабочего органа.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила $F_{тн}$, необходимая для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному ниже его, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта. Сложив силы, необходимые для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному выше $F_{тв}$, сбоку $F_{тб}$ и ниже грунтового клина $F_{тн}$, получим силу $F_{тсм}$, необходимую для преодоления трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта

$$F_{тсм} = F_{тв} + F_{тб} + F_{тсм}. \quad (9)$$

Рассчитав в программе Microsoft Excel параметры на основе принятых данных, построим зависимость $F_{тсм} = f(\varphi)$. Затем вычислим суммарную силу смещения грунта активным рабочим органом при повороте ротора. Сила трения одной боковой плоскости долота о грунт $F_{тб} = f_{с-г}N_б$. Нормальное давление грунта на боковую плоскость активного рабочего органа

$$N_б = \sigma_y S_{ро}. \quad (10)$$

Из теории предельного равновесия [7]:

$$\sigma_y = \overline{q_0}\gamma z. \quad (11)$$

Примем точку приложения нормального давления грунта на боковую плоскость активного рабочего органа на глубине $z = 2/3$ от поверхности земли и определим расстояния z и площади боковых поверхностей активного рабочего органа $S_{ро}$, погружённых в грунт, в каждом положении ротора.

Если боковые плоскости активного рабочего органа выполнены параллельными, то силу трения боковых плоскостей о грунт можно определить с помощью графических построений и по формулам 10 и 11. Если боковые плоскости активного рабочего органа выполнить сходящимися от передней поверхности к задней, при достаточной прочности активного рабочего органа, то можно уменьшить необходимый вращающий момент. Поэтому в дальнейших расчётах силу трения боковых плоскостей о грунт не учитываем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, что один микроотрыв грунта при внедрении активного рабочего органа происходит на пути $l_0 = 18$ мм. Тогда площадь отрыва (формула 1) $S_0 = 432$ мм^2. Сила резания (2) $F_{сд} \approx 4$ *Н*. Примем шаг поворота вала ротора 11,25°. Изменяя угол поворота ротора, из построений определяем $S_б$ – площадь сечения сдвигаемого грунта в продольном сечении и $S_н$ – по нижней плоскости; $l_{сд} = B_i E_i$ – длину сдвига (например в положении 1, $l_{сд} = B_1 E_1$). Воспользовавшись программой Microsoft Excel, по формуле 4 вычисляем площадь сдвига, по формуле 3 силу, необходимую для сдвига грунта в каждом положении рабочего органа. Результаты расчётов объёмов грунта, сдвигаемого передней поверхностью активного рабочего органа при зажатом резании, силы сдвига при прохождении активного рабочего органа в грунте помещаем в таблицу. Определив в каждом положении силу сдвига, построим на основе принятых данных и аппроксимируем график зависимости $F_{сд} = f(\varphi)$ (рисунок 4).

Из графика определим среднее значение силы и её условные значения в любой момент времени. Направление вектора и точка его приложения в каждом положении – по биссектрисе угла между $B_i E_i$ и $B_{i-1} E_{i-1}$ (см. рисунок 2, б). Условно изменение силы сдвига грунта можно аппроксимировать полилинейной зависимостью (см. рисунок 3). Среднее значение аппроксимированной силы сдвига при прохождении активного рабочего органа в грунте $F_{сд}/2 = 62{,}7$ *Н*.

Масса смещаемого грунта изменяется по мере поворота ротора. Примем шаг поворота вала ротора 11,25° и выполним построения. Расстояние смещения грунта $s_{см} = M_i M_{i-1}$ (например в положении 1 активного рабочего органа, $s_{см} = M_1 M_0$ и площадь сечения смещаемого грунта определим измерением из построений. Объём смещаемого грунта $V_{см}$ вычислим, умножив площадь сечения смещаемого грунта $S_{см}$ на ширину b активного рабочего органа: $V_{см} = S_{см} b$. Масса смещаемого грунта $m_{см} = \rho V_{см}$. Вычисления удобно осуществлять в программе Microsoft Excel. Если воспользоваться принятыми данными [25, 26], то зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора имеет вид, показанный на рисунке 5. Здесь и далее на поле графиков показаны зависимости функций от аргументов, полученные в результате аппроксимаций, и доверительные показатели аппроксимаций.

Если техническое средство разработки грунта агрегатировать с трактором Т-150К (ХТЗ-17221), при движении трактора на первой передаче второго диапазона угловая скорость вала ротора $\omega_р = 28{,}4$ *рад/с*. Угол поворота ротора на 11,25° соответствует $\varphi = 0{,}197$ *рад*. Время поворота ротора на этот угол $\tau_1 = \frac{\varphi}{\omega_р} == \frac{0{,}197}{28{,}4} \approx 0{,}007$ *с*.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

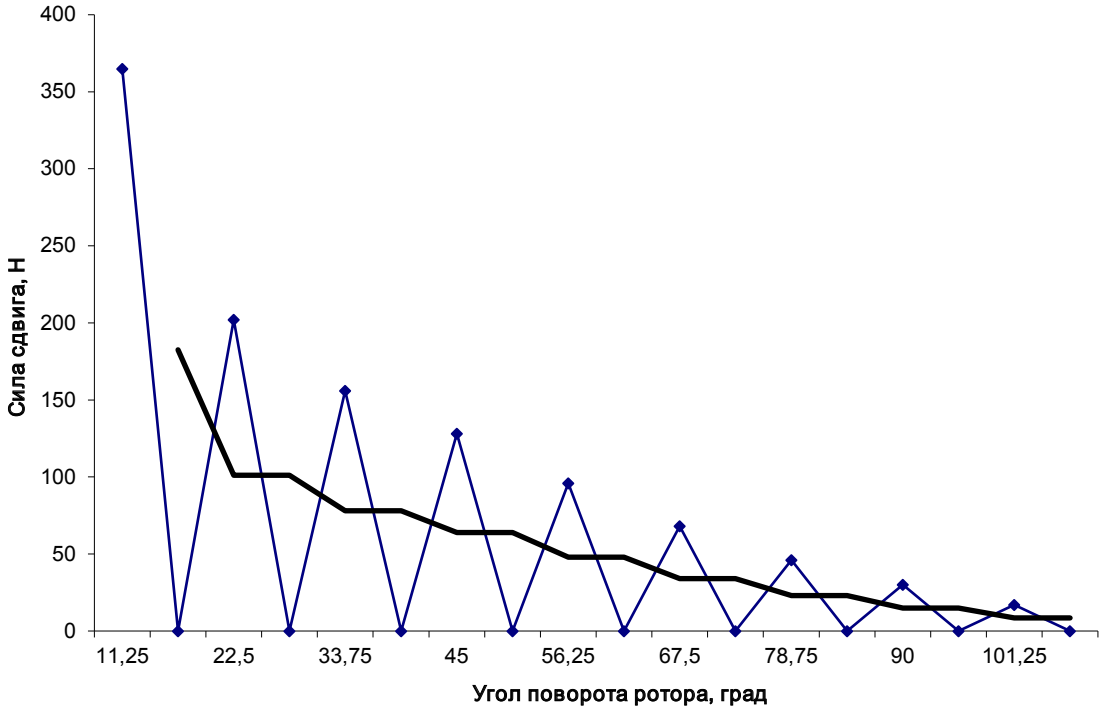


Рисунок 4 – Зависимость силы, необходимой для сдвига грунта активным рабочим органом, от угла поворота ротора

Figure 4 – Dependence of the force required to shift the ground by an active working body of the angle of the rotor turn

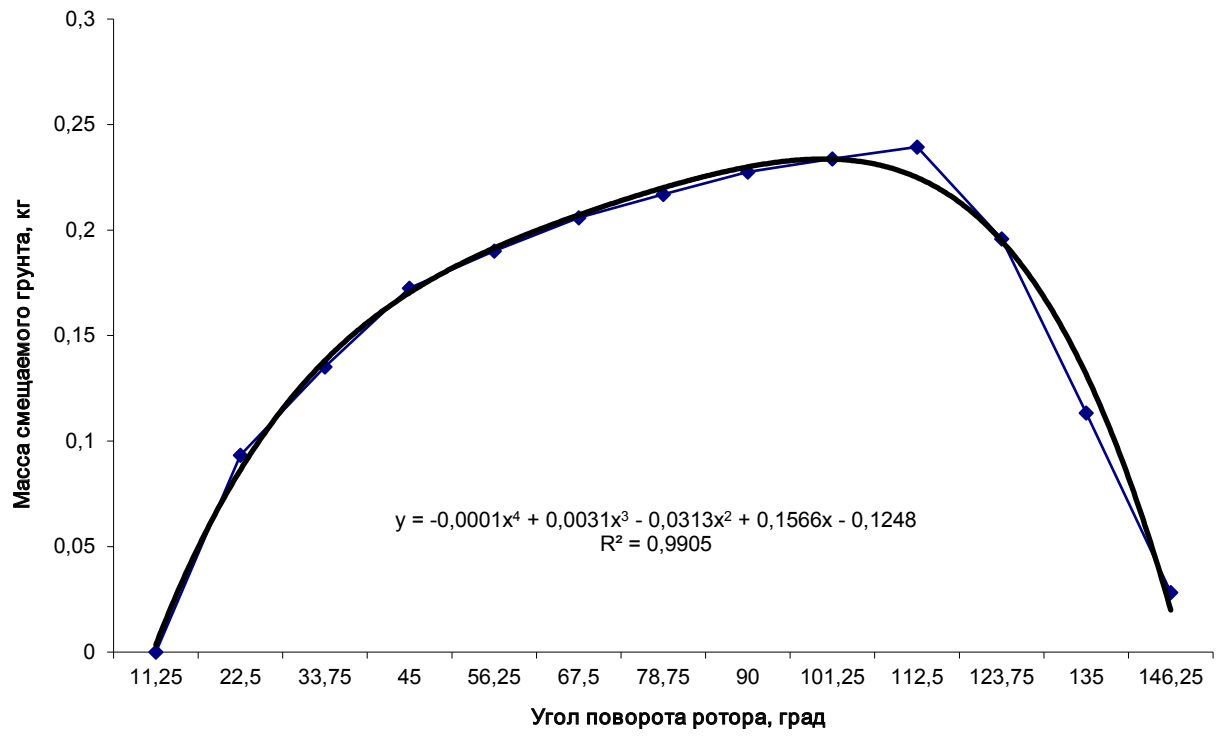


Рисунок 5 – Зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 5 – Dependence of the mass of the displaced ground from the angle of the rotor

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

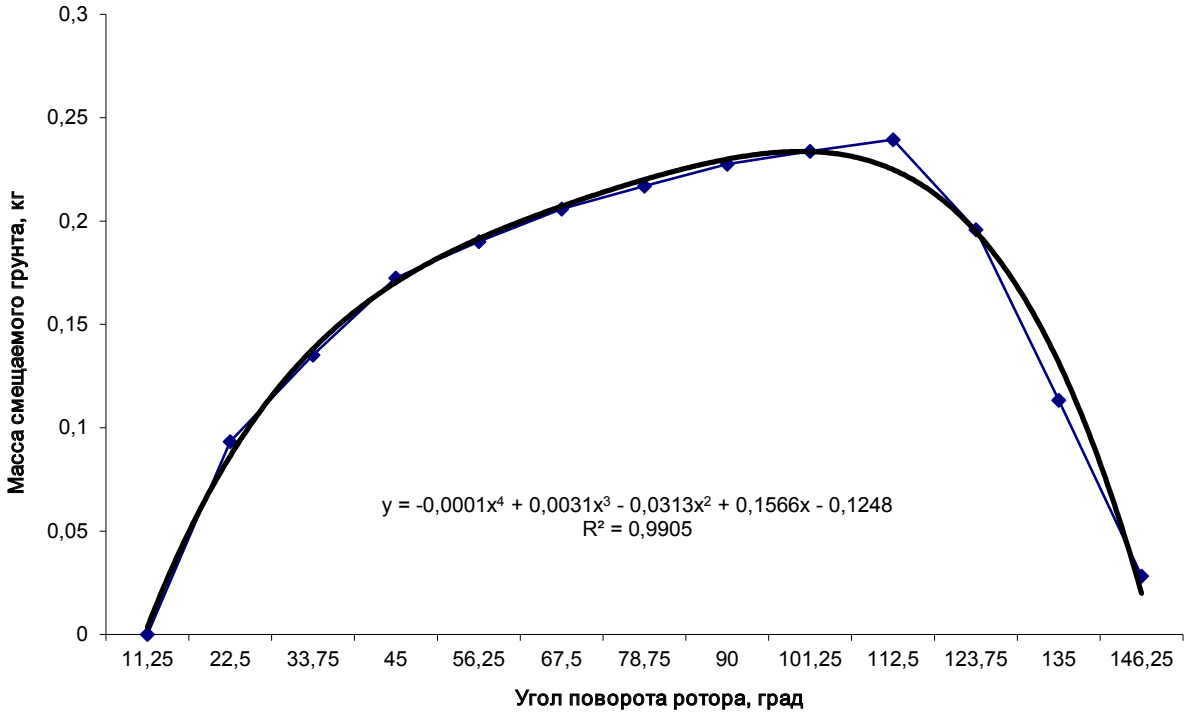


Рисунок 5 – Зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 5 – Dependence of the mass of the displaced ground from the angle of the rotor

Время поворота ротора при движении трактора на второй, третьей и четвёртой передачах второго диапазона, соответственно, $\tau_2 \approx 0{,}006$ *с*, $\tau_3 \approx 0{,}005$ *с*, *с*, $\tau_4 \approx 0{,}004$ *с*. При расчёте остальных параметров использованы общеизвестные формулы теоретической механики. Результаты вычислений силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, при изменении угла поворота ротора и движении трактора ХТЗ-17221 на первой, второй, третьей и четвёртой передачах второго диапазона заносим в таблицу и строим соответствующие графики. Зависимость ускорения смещаемого грунта от угла поворота ротора при заданных условиях разработки грунта показана на рисунке 6, аппроксимация графика первой передачи. Зависимость силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора представлена на рисунке 7.

Хотя масса смещаемого грунта невелика, её ускорение достигает очень больших значений. Ускорение грунта на четвёртой передаче в среднем в 3 раза больше, чем ускорение на первой передаче. Сила, необходимая для создания такого ускорения грунта при движении на четвёртой передаче, также в среднем в 3 раза больше, чем на первой передаче.

В расчёте было допущение, что при переходе активного рабочего органа из предыдущего положения в последующее положение ускоряется вся расчётная масса смещаемого грунта. Такое допущение, возможно, привело к несколько завышенным значениям силы, необходимой для создания ускорения грунта. Но определение, какая часть смещаемого грунта получила в том или ином положении первоначальное ускорение, а какая часть грунта уже ускорилась в предыдущей стадии, а в рассматриваемой стадии получает только дополнительное ускорение, является чрезвычайно сложной задачей.

При движении на первой передаче II диапазона трактора ХТЗ-17221 силы инерции смещаемого грунта меньше, чем при движении на более высоких передачах. Сила, необходимая для придания ускорения смещаемому грунту, монотонно увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повернётся на угол около 120º от положения, соответствующего моменту вхождения в грунт. При дальнейшем повороте активного рабочего органа сила, необходимая для придания ускорения смещаемому грунту, уменьшается.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

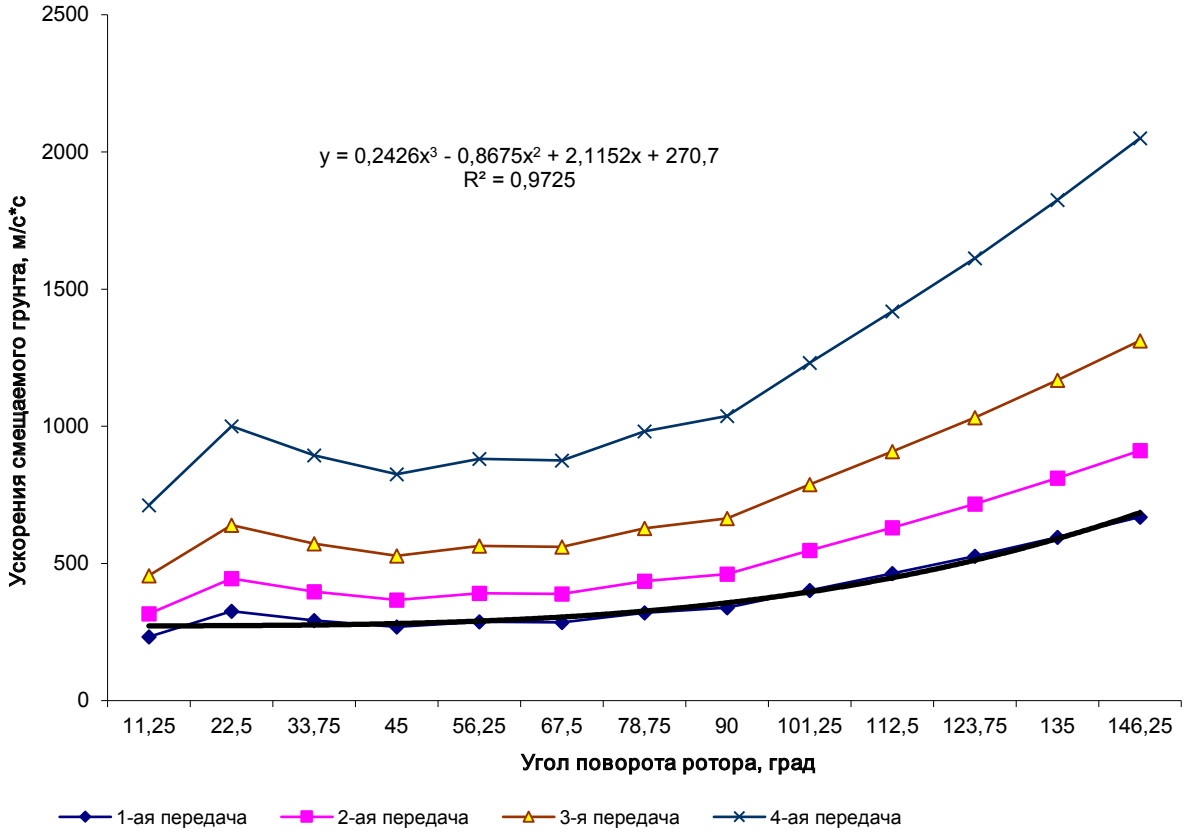


Рисунок 6 – Зависимость ускорения смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 6 – Dependence of acceleration of shifted soil from the rotor angle

Объём $V_в$ вытесняемого грунта равен сумме объёмов грунта (см. рисунок 2, а), расположенного по ходу активного рабочего органа V_1, справа от активного рабочего органа V_2 и слева от активного рабочего органа V_3. Измерив площади аналогичных треугольников при различных положениях ротора, вычислим объём вытесняемого грунта, равный сумме объёма параллелепипеда и объёмов двух пирамид. Затем определим массу $m_в$ вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа и построим зависимость массы вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа от угла поворота ротора при принятых условиях разработки грунта (рисунок 8). Масса вытесняемого грунта над грунтовым клином резко увеличивается при повороте активного рабочего органа на угол до 45°, а затем плавно уменьшается.

Из чертежей определяем высоту пирамиды грунта, воздействующего на боковую поверхность смещаемого грунтового клина в каждом положении активного рабочего органа, его объём, массу и силу тяжести. Силу воздействия окружающего грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина в каждом положении активного рабочего органа определяем по формуле 7. Зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина от угла поворота ротора на рисунке 9.

Сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повернётся на угол около 100° от положения, соответствующего моменту его вхождения в грунт. При дальнейшем повороте ротора сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина уменьшается.

Исходя из массы вытесняемого грунта, определяем его силу тяжести в различных положениях ротора. Спроецировав её на направление нормали к поверхности грунтового клина, получим нормальную силу. Так как коэффициент трения грунта о грунт $\varphi_{г-г} = 1$, силу трения верхней части грунтового клина об окружающий грунт определяем по формуле 6. Силу трения боковой поверхности грунтового клина об окружающий грунт определяем по формуле 7.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

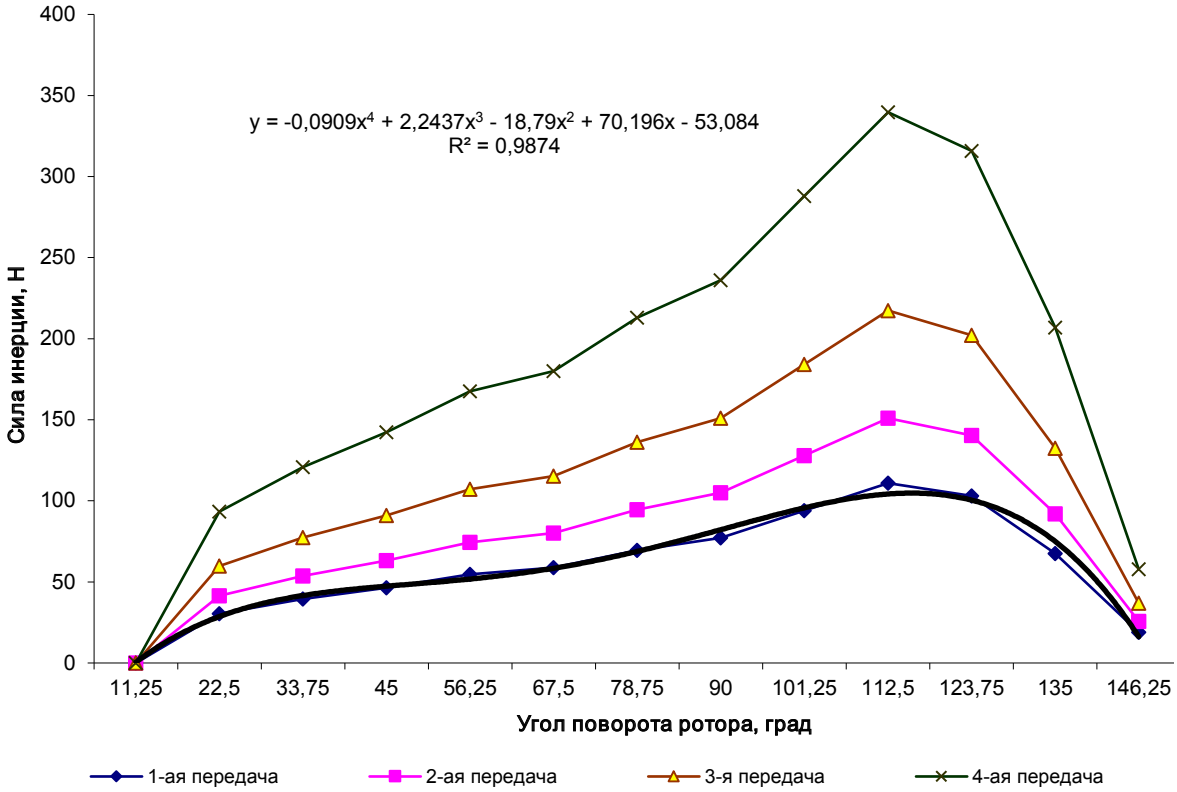


Рисунок 7 – Зависимость силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора

Figure 7 – Dependence of force needed to accelerate the displaced ground from the rotor angle

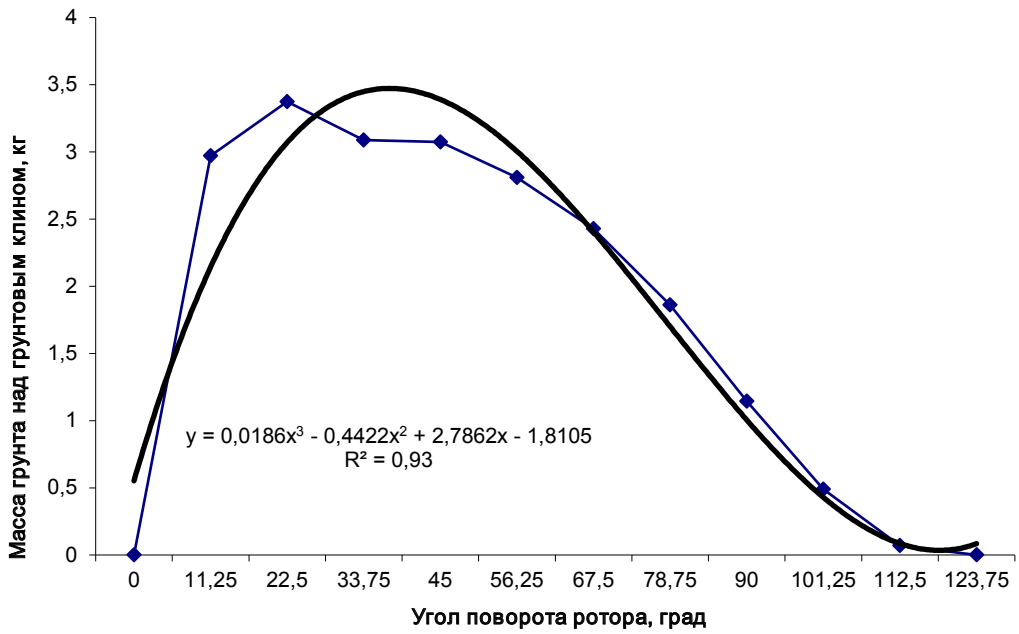


Рисунок 8 – Зависимость массы грунта над грунтовым клином от угла поворота ротора

Figure 8 – Dependence of the ground mass over the ground wedge from the rotor angle

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Нижняя поверхность грунтового клина воздействует на массив грунта суммарной силой $G_{\Sigma см}$ тяжести смещаемого грунта, которую определяем по формуле 8. Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила $F_{тн}$, необходимая для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному ниже его, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта. Сложив силы, необходимые для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному выше $F_{тв}$, сбоку $F_{тб}$ и ниже грунтового клина $F_{тн}$, получим силу $F_{тсм}$, необходимую для преодоления трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта (формула 9). Результаты вычислений силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при различных углах поворота ротора заносим в таблицу. Зависимость силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта от угла поворота ротора представлена на рисунке 10. Её можно аппроксимировать лишь полиномом четвёртого порядка.

Сила трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при его вхождении в грунт резко увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повернётся на угол около 35º от положения, соответствующего моменту его вхождения в грунт. При дальнейшем повороте ротора от 35º до 80º сила трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта изменяется незначительно.Придальнейшемповоротероторaона уменьшается.

Сложив силы, необходимые для придания ускорения смещаемому грунту, силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при различных углах поворота ротора, вычислим суммарные силы смещения грунта активным рабочим органом при различных углах поворота ротора. Зависимость суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221 показана на рисунке 11.

Суммарная сила смещения грунта активным рабочим органом резко увеличивается от момента вхождения активного рабочего органа в грунт до его поворота на угол около 35º. При дальнейшем повороте ротора от 35º до 110º суммарная сила смещения грунта активным рабочим органом увеличивается незначительно. При дальнейшем повороте ротора она уменьшается.

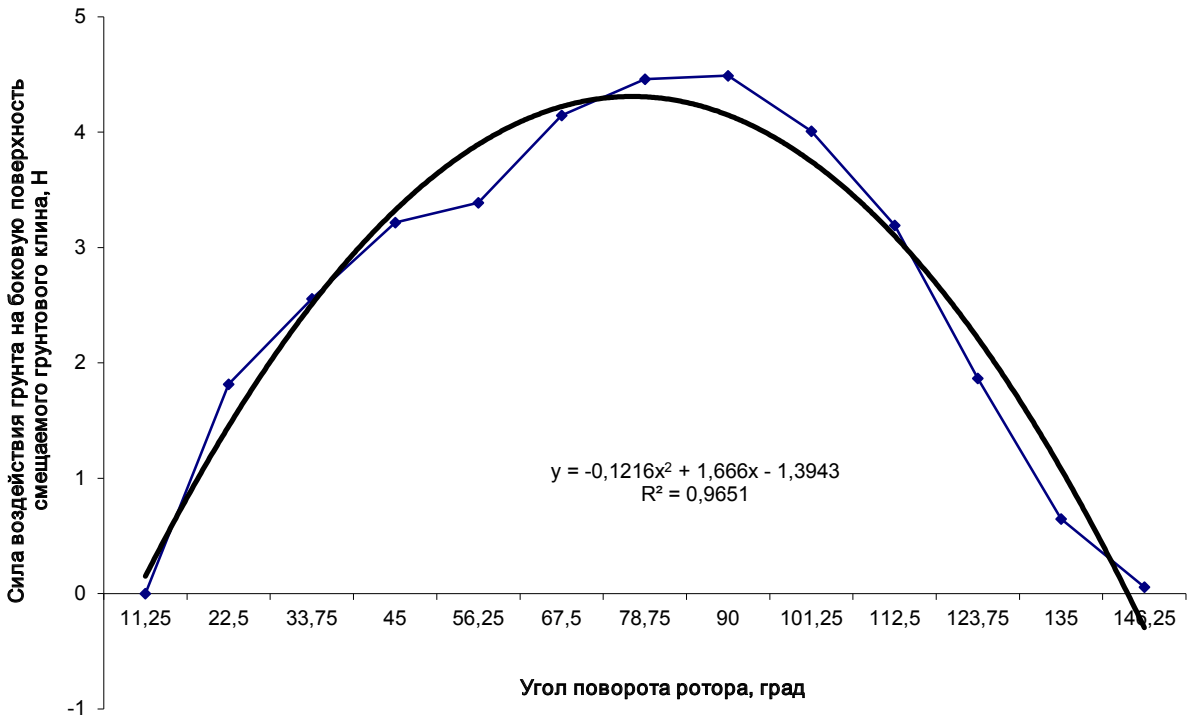


Рисунок 9 – Зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина от угла поворота ротора

Figure 9 – Dependence of ground force on the side surface of the displaced ground wedge from the rotor angle

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

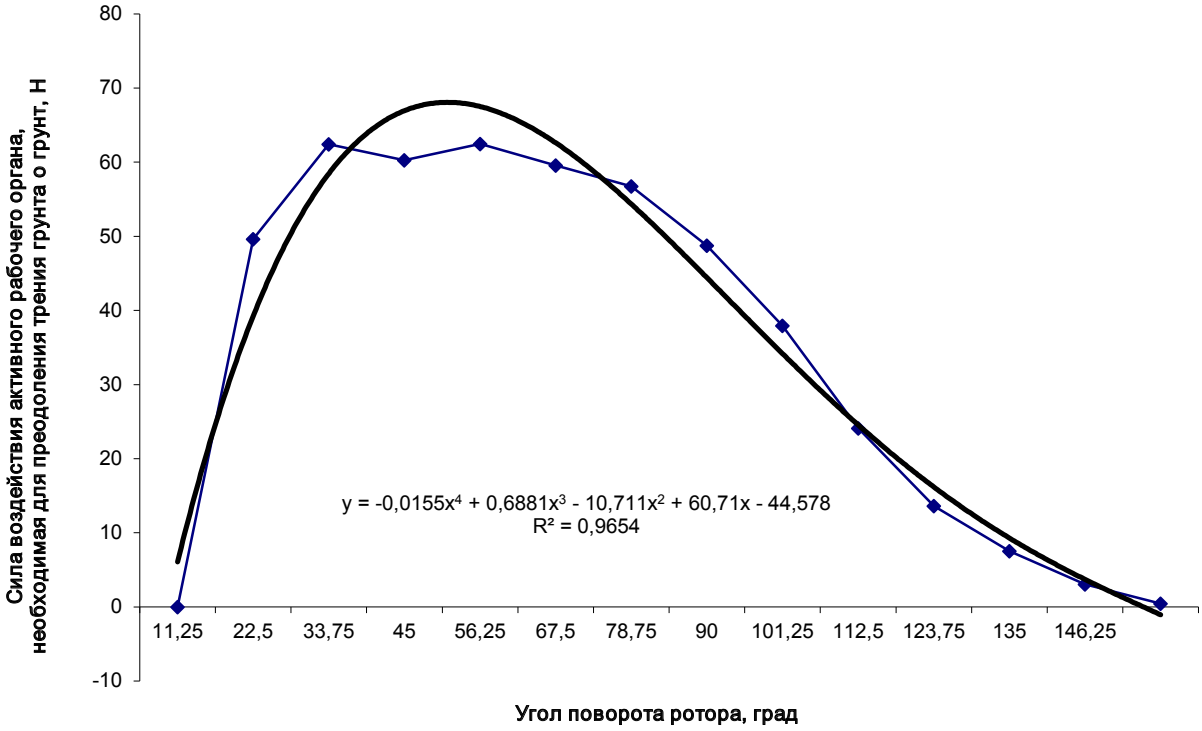


Рисунок 10 – Зависимость силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта от угла поворота ротора

Figure 10 – Dependence of friction force displaced by the active working body of the ground wedge on the array of soil from the rotor angle

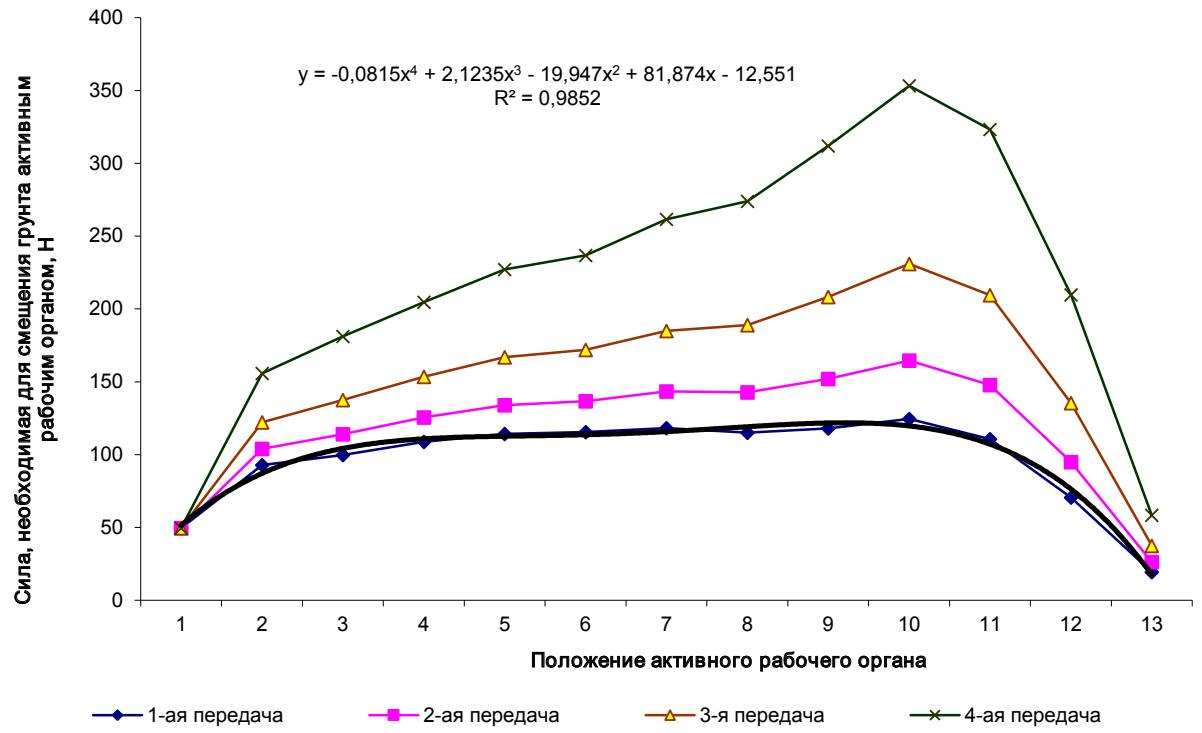


Рисунок 11 – Зависимость суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221

Figure 11 – Dependence of the total force of ground displacement by an active working body from the rotor angle when moving the unit on various transmissions of the II range HTP-17221 tractor

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа взаимодействия активного рабочего органа с грунтом при зажатом резании выявлена сила резания грунта носком рабочего органа и зависимости от угла поворота ротора: силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом. Зная эти силы и точки их приложений, несложно определить необходимый вращающий момент и мощность привода ротора, если все рабочие органы осуществляют зажатое резание, когда лезвие зажато грунтом с обеих сторон [25]. Для реализации цели исследования необходимо также произвести анализ взаимодействия активных рабочих органов с грунтом при полузажатом резании, то есть резании, когда к лезвию прижат грунт лишь с одной стороны, в том числе, когда силой воздействия грунта на лезвие с другой стороны можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

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

3. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36–42.

4. Карнаухов А.И., Орловский С.Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. №1. С. 20–22.

5. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47–49.

6. 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.

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

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

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

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

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

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

16. 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.

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

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

19. 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.

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

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

22. 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.

23. 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.

24. 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.

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

26. Николаев В.А. Ориентировочный расчёт мощности циклического резания грунта // Вестник СибАДИ, 2019. №3. С. 228–240.

REFERENCES

1. Zhuk A.F. Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tehnologicheskoj shemy i parametrov rotacionnogo pluga [Theoretical substantiation of rational technological scheme and parameters of rotary plow]. *Sbornik nauchnyh trudov «Teorija i raschjot pochvoobrabatyva-*

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

jushhih mashin. T 120. Moscow, Mashinostroenie, 1989. P 145–153 (in Russian).

2. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of the cutters]. Moscow, *Materialy NTS VISHOM*. 27. ONTI VISHOM, 1970. P. 490–497 (in Russian).

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

4. Karnaukhov A.I. Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevymi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20–22 (in Russian).

5. Kravets I.M. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjagovogo usilija dlja mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Determine critical cutting depth while soils' combined cutting]. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49 (in Russian).

6. Kirillov F.F. [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for working bodies of earthmoving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44–48 (in Russian).

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

8. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Improving the efficienc of the working mechanisms for the development of frozen soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42–44 (in Russian).

9. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers. Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38–40 (in Russian).

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

11. 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.

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

13. 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.

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

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

16. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12–15 (in Russian).

17. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7-10. (in Russian)

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

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

20. Syomkin D.S. O vliyanii skorosti rabochego organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the impact of the speed of the working body on the force of resistance to ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37-43 (in Russian).

21. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31–39 (in Russian).

22. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32–39 (in Russian).

23. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47–54 (in Russian).

24. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13–19 (in Russian).

25. Nikolaev V.A. Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschyot [Soil processing machines. Theory and calculation]. YAroslavl': Izd-vo FGBOU VPO YAGSKHA, 2014: 358 (in Russian).

26. Nikolaev V.A. Orientirovochnyj raschyot moshchnosti ciklicheskogo rezaniya grunta [Estimated calculation of the power of cyclical cutting of the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 3: 228–240 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 629.11
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-658-668

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА РЕМОНТНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

В.Е. Овсянников, В.И. Васильев
Курганский государственный университет,
г. Курган, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В конструкциях строительно-дорожных машин доля чугунных деталей в общей массе некоторых машин достигает 60%. Из данного материала изготавливаются блоки цилиндров, детали тормозных систем, маховики и т.д. Одной из основных причин эксплуатационных отказов (до 70%) строительно-дорожных машин является выход из строя узлов трения. Учитывая то, что контактирующие детали в данных узлах воспринимают нагрузку преимущественно поверхностными слоями, их работоспособность теряется при сравнительно небольших значениях размерного износа, хотя при этом массовый износ детали, как правило, не превышает 1%.*

Материалы и методы. *Был проведен комплексный технико-экономический анализ методов ремонта узлов трения. В результате было показано, что наилучшим сочетанием критериев обладает метод ремонтных размеров. Однако при традиционной технологии восстановления в ремонтный размер удаляется упрочненный слой. При этом серый чугун возможно упрочнять лишь очень дорогими и трудоемкими методами, которые в условиях реального ремонтного производства не применимы. Рассматривается возможность использования нового метода упрочнения деталей из чугуна в ремонтном производстве.*

Результаты. *Разработанный способ позволяет упрочнять серый чугун с толщиной слоя до 3 мм. Отличительной особенностью является то, что твердость упрочненного слоя по толщине возрастает, при этом удается увеличить микротвердость по сравнению с исходным серым чугуном более чем в 2 раза. И получить износостойкость, сопоставимую с высокопрочным закаленным чугуном.*

Обсуждение и заключение. *В ходе исследований было выявлено, что лучшие результаты удается получить при использовании печей с восстановительной атмосферой. Для расширения сферы применения способа предлагается использование специального приспособления, создающего необходимые условия в любой печи. Применение предлагаемых технических решений позволяет повысить эффективность ремонта деталей строительно-дорожных машин из серого чугуна.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *строительно-дорожные машины, ремонт, серый чугун, упрочнение, анализ методов, проектирование операций.*

Поступила 16.08.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.*

Для цитирования: Овсянников В.Е., Васильев В.И. Повышение эффективности метода ремонтных размеров при восстановлении деталей строительно-дорожных машин из серого чугуна. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 658–668. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-658-668

© Овсянников В.Е., Васильев В.И.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-658-668

RESTORATION OF THE CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES' DETAILS FROM GREY CAST IRON: IMPROVEMENT OF THE REPAIR DIMENSIONS' METHOD EFFICIENCY

Victor E. Ovsyannikov, Valery I. Vasilyev
Kurgan State University,
Kurgan, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The total mass of some grey cast iron details in construction and road machines reaches 60%. Cylinder blocks, parts of braking systems, flywheels, etc. are made of cast-iron. One of the main causes of operational failures (up to 70%) of construction and road machines is failure of friction units. Considering that the contacting parts in these units take the load mainly by surface layers. The operability looses at relatively small values of dimensional wear. Although mass wear of the part usually does not exceed 1%.*
Materials and methods. *The authors carried out a comprehensive technical and economic analysis of repair methods of friction assemblies. As a result, the best combination of criteria was the repair size method. However, the strengthened layer was removed to the repair dimension by conventional reconditioning technology. At the same time grey cast iron was strengthened only by very expensive and labor-intensive methods, which in conditions of real repair production were not applicable. The authors considered the possibility of using a new method of strengthening iron parts in repair works.*
Results. *The developed method strengthened grey cast iron with layer thickness up to 3 mm. The distinctive feature was that hardness of the strengthened layer in thickness increased. At the same time the microhardness increased in comparison with the initial grey iron more than 2 times and wear resistance became comparable to high-strength hardened stun.*
Discussion and conclusions. *The authors obtain the best results with the usage of reducing atmosphere furnaces. In order to expand the scope of the method, the researches proposed to use a special device creating the necessary conditions in any furnace. The application of the proposed technical solutions increases the efficiency of the construction and road machines' repair.*

KEYWORD: *construction and road machines, repair, grey cast iron, hardening, methods' analysis, design of operations.*

Submitted 16.08.2019, revised 17.12.2019.
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.

ACKNOWLEDGEMENTS. *Authors express their gratitude to the reviewers of the paper.*

For citation: Ovsyannikov Victor E., Vasilyev Valery I. Restoration of the construction and road machines' details from grey cast iron: improvement of the repair dimensions' method efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2019;16(6): 658–668 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-658-668

© Ovsyannikov V.E., Vasilyev V.I.

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

ВВЕДЕНИЕ

В конструкциях строительно-дорожных машин доля чугунных деталей в общей массе некоторых машин достигает 60%. Из данного материала изготавливаются блоки цилиндров, детали тормозных систем, маховики, головки цилиндров, гильзы, распределительные и карданные валы, корпусные детали и т.д. В зависимости от условий работы детали к материалу могут предъявляться различные требования, например, для кулачков и высоконагруженных валов чугуны легируют молибденом, хромом или никелем, что дает возможность произвести закалку детали. В случае интенсивного тепловыделения или больших перепадов температур (барабаны, тормозные диски и т.д.) поверхностный слой чугунных деталей склонен к появлению поверхностных трещин, поэтому его структура должна быть перлитной с шаровидным графитом.

Одной из основных причин эксплуатационных отказов (до 70%) строительно-дорожных машин является выход из строя узлов трения. Учитывая то, что контактирующие детали в данных узлах воспринимают нагрузку преимущественно поверхностными слоями, их работоспособность теряется при сравнительно небольших значениях размерного износа, хотя при этом массовый износ детали, как правило, не превышает 1%. Возникает необходимость в техническом воздействии по восстановлению ее работоспособности.

Как показывает практика, в настоящее время только 15–20% изношенных деталей строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин из серого чугуна подвергаются восстановлению, а 40–60% утилизируются. Причем для того чтобы реализовать процесс утилизации и последующего изготовления новых деталей, требуются гораздо большие затраты природных и финансовых ресурсов и наносится значительный ущерб экологии.

Существует довольно большое количество методов восстановления и ремонта изношенных деталей пар трения строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин, которые применимы, в том числе и для изделий из серого чугуна. На рисунке 1 представлена классификация методов по виду технологического воздействия[1,2,3] [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

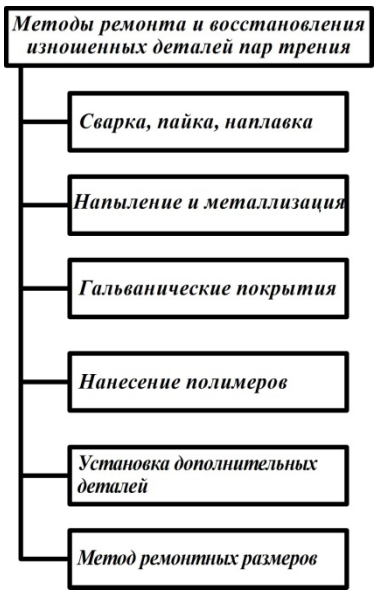


Рисунок 1 – Методы ремонта и восстановления деталей пар трения

Figure 1 – Methods of repair and restoration of friction pair parts

Целью работы является повышение эффективности ремонта деталей строительно-дорожных машин из серого чугуна на основе совершенствования метода обработки в ремонтный размер. Использование термодиффузионного поверхностного легирования дает возможность не проводить повторное упрочнение после обработки деталей в ремонтный размер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнение технических и экономических возможностей методов удобно делать на основе использования метода анализа иерархий[4]. В рассматриваемом случае предполагается решение задачи для двух уровней иерархии по выбору из шести альтернатив по пяти критериям.

[1] Криштал М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. М. : Металлургия, 1972. 400 с.

[2] Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М. : Металлургия, 1989.136 с.

[3] Новиков А.Н. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей: учебное пособие / А.Н. Новиков, М.П. Стратулат, А.Л. Севостьянов. Орел :ОрелГТУ, 2006. 334 с.

[4] Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

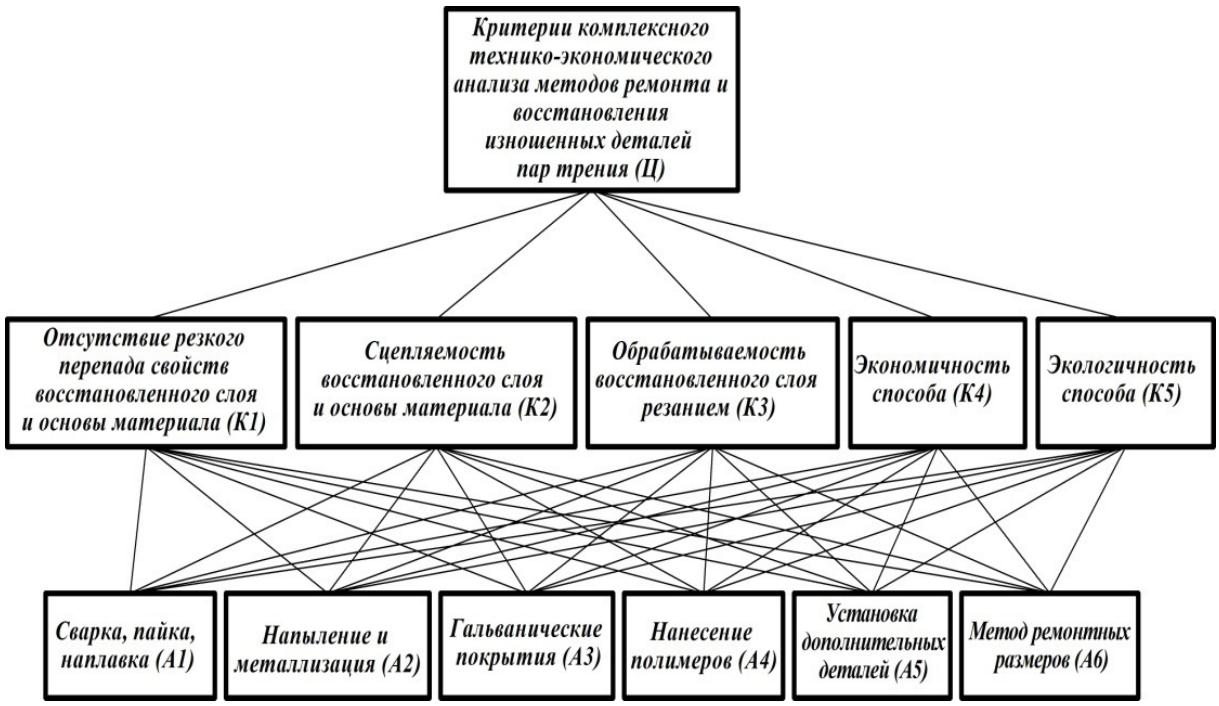


Рисунок 2 – Полная доминантная иерархия

Figure 2 – Full dominant hierarchy

Анализ будем проводить применительно к ремонту и восстановлению деталей из серого чугуна, т.к. данный материал достаточно трудно подвергается упрочнению.

Перечень альтернативных вариантов приведен на рисунке 2, а в качестве критериев можно выделить следующие:

1. Отсутствие резкого перепада свойств восстановленного слоя и основы (К1).

2. Сцепляемость восстановленного слоя и основы материала (К2) (количественно оценивается коэффициентом сцепляемости).

3. Обрабатываемость восстановленного слоя резанием (К3) (количественно оценивается коэффициентом обрабатываемости).

4. Экономичность способа (К4).

5. Экологичность способа (К5).

Первые три критерия оказывают непосредственное влияние на послеремонтную надежность, а критерии 4 и 5 являются дополнительными с точки зрения затрат и влияния на экологию и здоровье рабочих. Полная доминантная иерархия приведена на рисунке 2.

В уровне целей производилось последовательное парное сравнение критериев (К) по степени их влияния на цель. В уровне альтернатив сравнивались между собой варианты технологий ремонта (А) по каждому из критериев. В качестве исходных данных были рассмотрены результаты исследований по каждому методу ремонта[5,6] [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. При вычислении численных значений коэффициентов использовалась шкала в баллах (от «абсолютно превосходит» (9 баллов) до «одинаковое влияние» (1 балл)). Расчеты проводились в программном пакете СППР Выбор 6.0 (рисунок 3).

[5] Криштал М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. М. : Металлургия, 1972. 400 с.

[6] Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М. : Металлургия, 1989.136 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

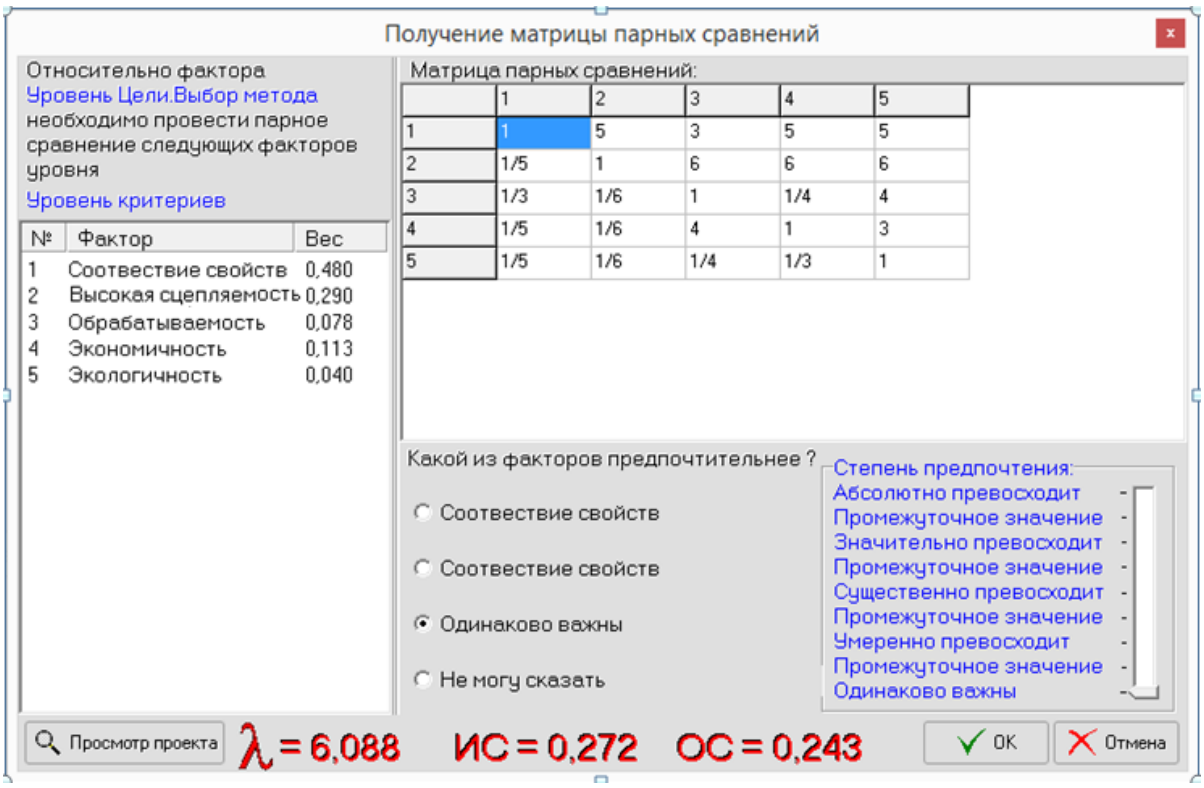


Рисунок 3 – Пример заполнения матрицы для уровня целей

Figure 3 – Example of filling a matrix for the goals' level

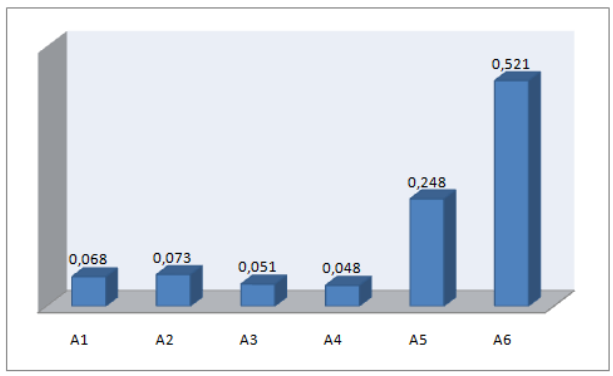


Рисунок 4 – Результаты комплексного технико-экономического анализа методов ремонта и восстановления изношенных деталей пар трения

Figure 4 – Results of complex technical and economic analysis of methods of repair and restoration of worn-out parts of friction pairs

Итоговое значение коэффициента является произведением коэффициентов на двух уровнях. На рисунке 4 приведены результаты комплексного технико-экономического анализа методов ремонта и восстановления изношенных деталей строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин.

Из рисунка 4 следует, что наилучшим сочетанием критериев обладает альтернатива А6 (метод ремонтных размеров). Однако одним из существенных обстоятельств, которое препятствует более широкому внедрению данного метода в практику, является проблема с восстановлением физико-механических

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

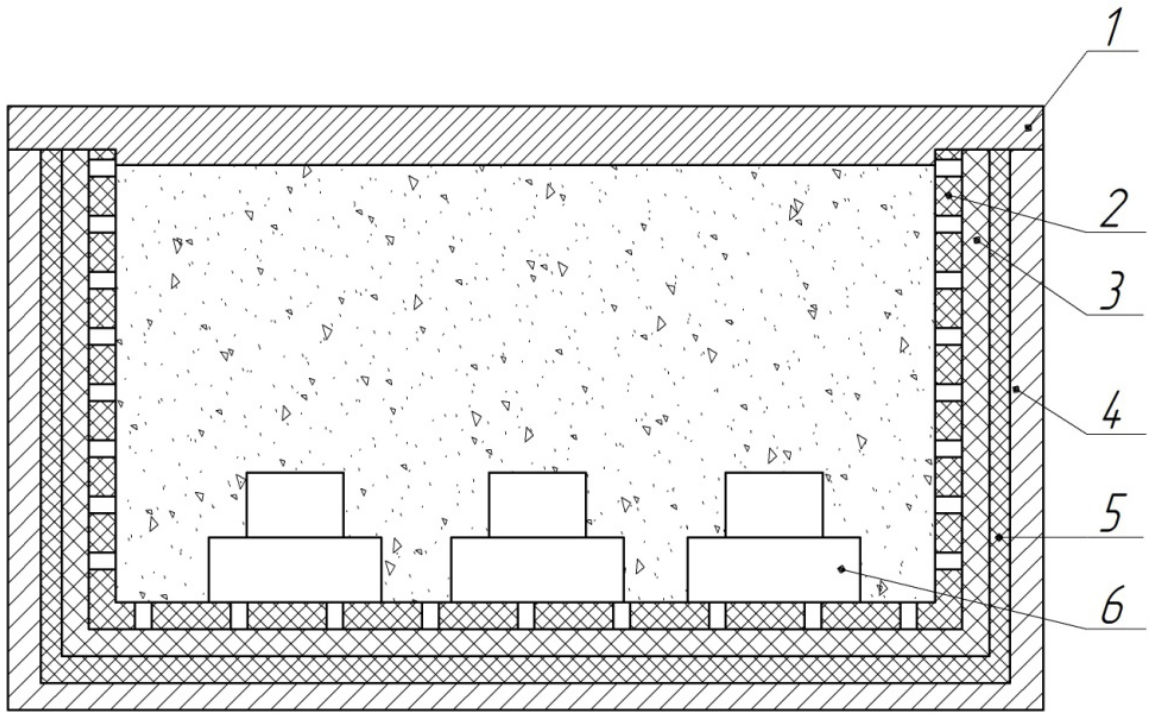


Рисунок 5 – Принципиальная схема приспособления для термодиффузионного поверхностного легирования

Figure 5 – Schematic diagram of the device for thermal diffusion surface alloying

свойств поверхностного слоя, т.к. большинство методов упрочнения серого чугуна малоприменимо в условиях реального ремонтного производства, чаще всего небольшой мощности. Таким образом, необходимо разработать такой способ поверхностного упрочнения серого чугуна, который не требует применения сложного и дорогостоящего оборудования, а также высокой квалификации рабочих.

Принципиально процесс термодиффузионного поверхностного легирования можно выполнять в любой печи. Однако исследования [12, 21] показали, что лучшее качество получается при использовании печей с защитной атмосферой. Данное оборудование является более дорогостоящим и сложным в обслуживании. Выходом из данной ситуации является использование приспособления[7], которое позволяет создать восстановительную атмосферу. Конструкция приспособления приведена на рисунке 5.

Приспособление включает в себя металлический ящик *4*, который закрывается крышкой *1*. Ящик обложен пластинами из графита *3*, которые окисляясь, образуют восстановительную атмосферу из оксида углерода. Пластины из графита изолированы от ящика и деталей *5* посредством прокладок *2*. Причем одна из прокладок выполнена пористой, для того чтобы газ CO поступал в активную зону (образуя защитную атмосферу). Прокладки используются, чтобы предотвратить процесс под плавления деталей и ящика от контакта с графитовыми платинами. Внутрь ящика засыпается оксид легирующего элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были проведены исследования процесса термодиффузионного поверхностного легирования в электрической печи с использованием приспособления (см. рисунок 5). На рисунке 6 приведены графики зависимости микротвердости по толщине слоя при упрочнении взаимодействием с оксидом молибдена.

[7] Патент RU № 186172. Устройство для диффузионного легирования // Овсянников В.Е., Васильев В.И; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет. Опубл. 11.01.2019. Бюл. № 2.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

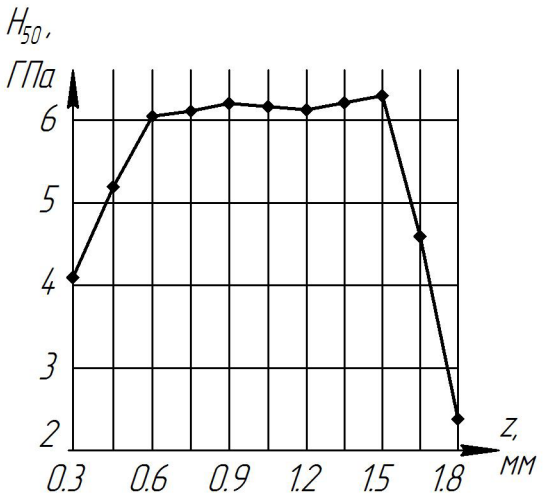


Рисунок 6 – Распределение микротвердости по толщине слоя оксид MoO_2, температура выдержки 1100 °С, время выдержки 4 ч

Figure 6 – Distribution of microhardness across layer thickness MoO_2 oxide, holding temperature 1100 °C, holding time 4 h

Как можно видеть из рисунка 6, микротвердость слоя по толщине возрастает, при этом удается ее увеличить по сравнению с исходным серым чугуном более чем в 2 раза и получить износостойкость, сопоставимую с высокопрочным закаленным чугуном [22]. На поверхности диффузионного слоя (от 0 до 0.3 мм) находится ферритная кайма, поэтому минимальное значение толщины слоя на рисунке 6 составляет 0.3 мм. В целом микротвердость упрочненного слоя существенно выше, чем основы чугуна. Данные подтверждаются металлографией. На рисунке 7 приведена микроструктура границы упрочненного слоя и основы чугуна.

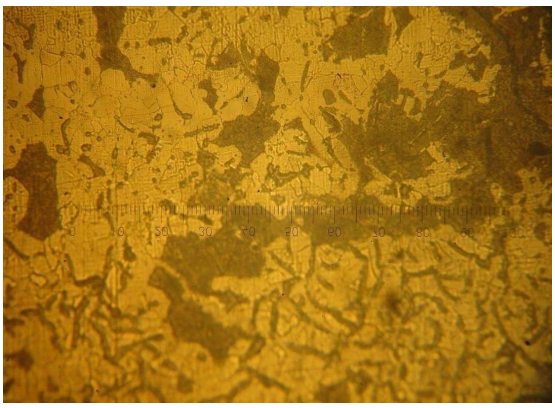
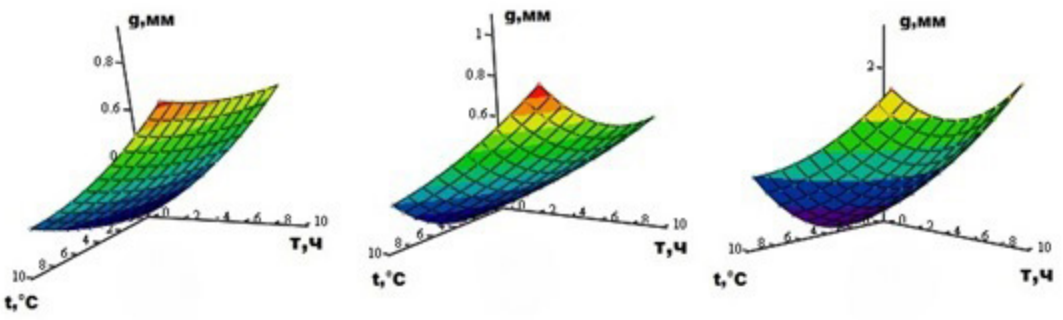


Рисунок 7 – Микроструктура границы упрочненного слоя и основы чугуна x400

Figure 7 – Boundary microstructure Strengthened layer and iron base x400

На рисунке 8 приведены зависимости толщины упрочненного слоя от режимов (времени выдержки т, ч и температуры в печи t, °С).

Как можно видеть из рисунка 8, толщина упрочненного слоя достигает 1–3 мм, что существенно больше, чем при использовании аналогов[8, 9][1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].



а б в

Рисунок 8 – Зависимости толщины упрочненного слоя от режимов а – оксид Feo; б – оксид Cr_2O_3; в – оксид MoO_2

Figure 8 – Dependences of the thickness of the hardened layer on the modes а – FeO oxide; б – Cr_2O_3 oxide; в – MoO_2 oxide

[8] Криштал М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. М. : Металлургия, 1972. 400с.

[9] Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М. : Металлургия, 1989.136 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица
Исходные данные для технико-экономического анализа методов

Table
Initial data for technical and economical methods' analysis

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателей			q_i	
		YLR 3000	Традиц. технол. диф. хром	Разработанная технол.		
1	Производительность установки, шт/смену	3	4	4	1,3	1
2	Толщина упрочненного слоя, мм	0,2	0,6	1,08	5,4	1.8
3	Мощность оборудования, кВт	20	16	10	2	1.6
4	Относительная износостойкость упрочненного слоя	4	4	4	1	1
5	Требуемая площадь, м^2	5	4	3	1	1,6
6	Стоимость установки, тыс. руб.	2500	650	100	25	6.5

При этом процесс ремонта с использованием указанного выше способа упрочнения серого чугуна можно представить следующим образом:

1. Термодиффузионное поверхностное легирование. Детали помещаются в контейнер, засыпаются порошком оксидов легирующих, выдерживаются в печи при температуре от 900 до 1100 °С в течение 2–8 ч.

2. Выполняется закалка. В работах [12, 21, 23, 24, 25] установлено, что можно применять нагрев в печи.

3. Выполняется финишная механическая обработка с целью получения необходимой величины ремонтного размера.

В рассматриваемом методе используются оксиды легирующих элементов, что делает процесс более дешевым. Проведем сравнение эффективности использования предлагаемого варианта реализации технологии с традиционными методами диффузионного легирования и лазерной закалкой. В таблице приведены исходные данные для технико-экономического анализа методов на примере корпуса редуктора.

Сравнительную оценку будем производить на основании расчета коэффициентов технического уровня:

$$K_{ТУ1} = \frac{1.3 + 5.4 + 2 + 1 + 1 + 25}{6} = 5.95$$

$$K_{ТУ2} = \frac{1 + 1.8 + 1.6 + 1 + 1.6 + 6.5}{6} = 2.3.$$

Как видим, эффективность ремонта с использованием рассматриваемой технологии выше, чем при традиционных подходах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать ряд выводов:

1. На поверхности детали из серого чугуна возможно получить упрочненный слой толщиной до 3 мм, что на порядок больше, чем при использовании аналогов (лазерной закалки).

2. Получаемый характер изменения твердости позволяет расширить сферу применения метода ремонтных размеров для деталей из серого чугуна. После удаления слоя материала при обработке в ремонтный размер, учитывая, что толщина упрочненного слоя превышает 1 мм, не возникает необходимости в повторном упрочнении.

3.Предлагаемый метод термодиффузионного поверхностного легирования можно использовать в технологических процессах изготовления деталей в условиях ремонтного производства, т.к. его реализация не требует сложного дорогостоящего оборудования и расходных материалов. Помимо этого процесс упрочнения довольно простой и не требует рабочих высокой квалификации.

4. В результате расчетов технического уровня было установлено, что эффективность ремонта с использованием рассматриваемой технологии выше, чем при традиционных подходах.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Майоров В.С., Майоров С.В. Закалка чугунных деталей излучением твердотелого лазера // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №3. С. 6–8.

2. Эдигаров В.Р., Алимбаева Б.Ш., Перков П.С. Комбинированная электромеханоультразвуковая обработка поверхностных слоев деталей машин // Вестник СибАДИ. 2017. 2(54)). С. 42–47. DOI:10.26518/2071-7296-2017-2(54)-42-47.

3. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Особенности формирования функциональных покрытий при электроискровом модифицировании металлических материалов // Вестник СибАДИ. 2017. (3(55)). С. 62–68. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-62-68.

4. Nisitani H., Tanaka S., Todaka T. Relation between microcrack and coaxing effect of aged 0,15% C steels after quenching at law temperatures // J. Soc. Mat. Sei Japan. 1980. №26. p. 317.

5. Cooper R.E., Rowlanel W.D., Beasley D. Atom. Weapons Res Estable // Atom Energy Auth Rept. 1971. 0,25/71. pp. 32–36.

6. Plenard E/ Cast iron domping capacity, structure and property relation // Modern Castings. 1962. V41/ pp. 14–26.

7. Gilbert G.N. Variation of the microstructure of flake graphite cast iron after stressing in tension and compression // BCJRA Journal. 1964. 1. p. 18–25.

8. Lampman S., Introduction to surface hardening of steels, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH, 1997. pp. 259–267.

9. Ruglic T., Flame hardening, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH. pp. 268–285, 1997.

10. John C. Ion, “Laser processing of Engineering Materials”,Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

11. Rana J, Goswami G L, Jha S K, Mishra P K, Prasad B V S SS, 2007, “Experimental studies on the micro structure and hardness of laser – treated steel specimens”, Optics and Laser Technology, 39, pp. 385–393.

12. Гуревич Ю.Г., Овсянников В.Е., Фролов В.А. Влияние катализатора (железа) на взаимодействие оксидов с основой феррито-перлитного серого чугуна, обеспечивающее закалку и диффузионное легирование: монография. Курган: Изд-во КГУ, 2013. 102 с.

13. Агеев Е.В., Агеева Е.В. Повышение качества ремонта и восстановления деталей современных транспортных средств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. №3. С. 503–508.

14. Бурумкулов Ф.Х., Окин М.А., Иванов В.И. Влияние физико-механических свойств и остаточных напряжений электроискровых покрытий на износостойкость соединений // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. N 2. С. 17–23.

15. Нефедов И.С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. №11. С. 15–17.

16. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. №2 (32). С. 130-135.

17. Слинко Д.Б., Капошко Д.А. Обеспечение эффективности наплавочных технологий при упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2018. № 11. С. 43–48.

18. Новкунский А.В., Новкунский А.А., Туманян М.О., Щулькин Л.П. Совершенствование конструкции и технологии ремонта конвейерного оборудования // Вестник СибАДИ. 2016. №2(48). С. 13-18. doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-13-18.

19. Редреев Г.В., Евстифеев В.В., Клюев И.А. Формирование защитного состава на поверхности деталей нагруженных пар трения // Вестник СибАДИ. 2015. №5(45). С. 36-38. doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5(45)-36-38.

20. Кузнецова В.Н., Ярмович Я.В. Пути увеличения ресурса элементов дробильно-размольного оборудования // Вестник СибАДИ. 2017. №1(53). С. 19-23. doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-19-23.

21. Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Ziganshin R.A. Using surface diffusion hardening in the manufacturing and repair technology of industrial vehicle components // International journal of mechanical engineering and technology. 2017. №9. pp. 399–406.

22. Овсянников В.Е. Васильев В.И. К вопросу применимости расчетного метода оценки сопротивления износу деталей после термодиффузионного упрочнения // Вестник СибАДИ. 2018. №3 (61). С. 412–420.

23. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G., Marfitsy V.V., Frolov V.A. Surface hardening of parts from ferrite-pearlite gray iron // Vetal science and head treatment. 2011. pp. 318–321.

24. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G, Frolov V.A. Development of technology for strengthening gray iron components by heating with iron scale // Metallurgist. 2012. pp. 526–529.

25. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G, Frolov V.A. Diffusion chromizing of grey iron by reaction with // Metallurgist. 2012. pp. 854–858.

REFERENCES

1. Mayorov V.S., Mayorov S.V. Training of pig-iron details radiation of the solid laser [Zakalka chugunnyh detalej izlucheniem tverdotelogo lazera]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. 2009; 3: 6–8 (in Russian).

2. Edigarov V.R., Alimbaeva B.S., Perkov P.S. Combined electromechanoultrasonic processing of surface coating of machinery. *Vestnik SibADI*. 2017; (2(54)): 42–47 DOI:10.26518/2071-7296-2017-2(54)-42-47 (in Russian).

3. Korotaev D.N., Ivanova E.V. Features of formation of functional coverings at electrospark modifying of

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

metal materials. *Vestnik SibADI*. 2017;(3(55)): 62–68. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-62-68 (in Russian).

4. Nisitani H., Tanaka S., Todaka T. Relation between microcrack and coaxing effect of aged 0,15% C steels after quenching at law temperatures. *J. Soc. Mat. Sei Japan*. 1980; 26: 317.

5. Cooper R.E., Rowlanel W.D., Beasley D. Atom. Weapons Res Estable. Atom Energy Auth Rept. 1971. 0,25/71: 32–36.

6. Plenard E/ Cast iron domping capacity, structure and property relation. Modern Castings. 1962. V41/ p. 14–26.

7. Gilbert G.N. Variation of the microstructure of flake graphite cast iron after stressing in tension and compression. BCJRA Journal. 1964; 1: 18–25.

8. S. Lampman, Introduction to surface hardening of steels, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH, pp. 259-267,. 1997.

9. T. Ruglic, Flame hardening, ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH. 1997: 268–285.

10. John C. Ion, “Laser processing of Engineering Materials”,Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

11. Rana J, Goswami G L, Jha S K, Mishra P K, Prasad B V S S S, 2007, “Experimental studies on the micro structure and hardness of laser – treated steel specimens”, Optics and Laser Technology, 39, 385–393.

12. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. *Influence of the catalyst (iron) on the interaction of oxides with a basis of ferrito-perlitny gray cast iron providing training and diffusive alloying* [Vliyanie katalizatora (zheleza) na vzaimodejstvie oksidov s osnovoj ferrito-perlitnogo serogo chuguna, obespechivayushchee zakalku i diffuzionnoe legirovanie]: monograph. Kurgan: KGU publishing house, 2013: 102.

13. Ageev E.V., Ageeva E.V. Improving the quality of repair and restoration of parts of modern vehicles [Povyshenie kachestva remonta i vosstanovleniya detalej sovremennyh transportnyh sredstv] // *News of the TulState University. Technical sciences*. 2011; 3: 503–508 (in Russian).

14. Burumkulov F. H., Okin M.A., Ivanov V.I. Influ ence of physical and mechanical properties and residual stresses of electric spark coatings on wear resistance of joints [Vliyanie fiziko-mekhanicheskih svojstv i ostatochnyh napryazhenij elektroiskrovyh pokrytij na iznosostojkost’ soedinenij]. *Repair, reconstruction, modernization*. 2009; 2: 17–23 (in Russian).

15. Nefedov I.S. Restoration of worn-out parts of machines with the help of additional repair parts made by methods of additive technologies [Vosstanovlenie iznoshennyh detalej mashin pri pomoshchi dopolnitel’nyh remontnyh detalej, izgotovlennyh metodami additivnyh tekhnologij]. *Repair. Restoration. Modernization*. 2018; 11: 15-17 (in Russian).

16. Ogin P.A. Structure and properties of overlap zones during laser hardening of steels and cast irons [Struktura i svojstva zon perekrytiya pri lazernoj zakalke stalej i chugunov]. *Vector of science of Tolyattin State University*. 2015; 2 (32):130–135 (in Russian).

17. Slinko D.B., Kaposhko D.A. Ensuring efficie cy of build-up technologies at strengthening of working tools of tillage machines [Obespechenie effektivnos ti naplavochnyh tekhnologij pri uprochnenii rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin]. *Repair. Restoration. Modernization*. 2018; 11: 43–48 (in Russian).

18. Novkun A.V., Novkun A.A., Tumanyan M.O., Schulkin L.P. *Improvement of the design and technology of repair of conveyor equipment* [Sovershenstvovanie konstrukcii i tekhnologii remonta konvejernogo oborudovaniya]. *Vestnik SibADI*. 2016; 2 (48):13-18. doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-13-18 (in Russian).

19. Redreev G.V., Evstifeev V.V., Kluev I.A. Formation of protective composition on the surface of parts of loaded friction pairs [Formirovanie zashchitnogo sostava na poverhnosti detalej nagruzhennyh par treniya]. *Vestnik SibADI*. 2015; 5 (45): 36-38. doi.org/10.26518/2071-7296-2015-5(45)-36-38 (in Russian).

20. Kuznetsova V. N., Yarmovich Y.V. *Ways to increase the resource of elements of crushing and grinding equipment*. *Vestnik SibADI*. 2017; 1 (53):19-23. doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-19-23 (in Russian).

21. Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Ziganshin R.A. Using surface diffusion hardening in the manufacturing and repair technology of industrial vehicle components. *International journal of mechanical engineering and technology*. 2017; 9: 399–406.

22. Ovsyannikov V.E., Vasilyev V.I. To the question of applicability of calculation method of assessment of resistance to wear of details after thermal diffusion hardening [K voprosu primenimosti raschetnogo metoda ocenki soprotivleniya iznosu detalej posle termodiffuzionnogo uprochneniya]. *Vestnik SibADI*. 2018; 3 (61): 412–420 (in Russian).

23. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G., Marfitsy V.V., Frolov V.A. Surface hardening of parts from ferrite-pearlite gray iron. *Metal science and head treatment*. 2011: 318–321.

24. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G, Frolov V.A. Development of technology for strengthening gray iron components by heating with iron scale. *Metallurgist*. 2012: 526–529.

25. Ovsyannikov V.E., Gurevich Y.G, Frolov V.A. Diffusion chromizing of grey iron by reaction with. *Metallurgist*. 2012: 854–858.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Васильев В.И. Организация работы авторского коллектива, проработка концепции исследования (50%).

Овсянников В.Е. Проработка теоретического материала, создание модели, вычисление и анализ результатов (50%).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

AUTHORS' CONTRIBUTION

Valery I. Vasilyev – 50% of the organization of the author's research process; elaboration of the research concept.

Victor E. Ovsyannikov – 50% of the study of theoretical material; model's creation; calculation and analysis of results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овсянников Виктор Евгеньевич – канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-8775-0781, доц. кафедры «Автоматизация производственных процессов», Курганский государственный университет, (640020, г. Курган, ул. Советская, 63, стр. 4, imk@kgsu.ru, vik9800@mail.ru).*

Васильев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1130-2181, проф. кафедры «Автомобильный транспорт», Курганский государственный университет, (640020, г. Курган, ул. Советская, 63, стр. 4, atas@mail.ru, vviprof@rtural.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor E. Ovsyannikov – Cand. of Sci. (Engineering), ORCID 0000-0002-8775-0781, Associate Professor of the Production Processes' Automation Department, Kurgan State University (640020, Kurgan, 63/4, Sovetskaya St., e-mails: imk@kgsu.ru, vik9800@mail.ru).*

Valery I. Vasilyev – Dr. of Sci. (Engineering), ORCID 0000-0002-1130-2181, Professor of the Automobile Transport Department, Kurgan State University (640020, Kurgan, 63/4, Sovetskaya St., e-mails: atas@mail.ru, vviprof@rtural.ru).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

РАЗДЕЛ II.
ТРАНСПОРТ

УДК 656.11; 656.021.3
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЗАГРУЗКЕ УДС ГОРОДА С УЧЕТОМ ДАННЫХ О ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ПРИДОМОВЫХ СТОЯНОК АВТОМОБИЛЕЙ

И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко
ФГБОУ ВО «ТулГУ»,
г.Тула, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Модели загрузки улично-дорожной сети позволяют понять многие транспортные, социальные, экологические и др. проблемы городов. Создание транспортных моделей требует знания природы формирования и функционирования транспортных потоков. В работе сформулирована цель и поставлены задачи для проведения исследования роли придомовых территорий жилых районов г. Тулы как одного из источников формирования городских транспортных потоков; выявления закономерностей влияния стоянок придомовых территорий на загрузку улично-дорожной сети.*

Материалы и методы. *Основой исследования являются разработки в области прогнозного имитационного моделирования автотранспортных систем. Инструментом для решения поставленных задач используется комплекс автоматизированного проектирования «TransNet», который позволит провести корректировку исходных данных в базовой модели результатами исследований о функционировании стоянок и парковок, расположенных на придомовых территориях.*

Результаты. *Обоснована потребность в уточнении общепринятой методики определения загрузки городской улично-дорожной сети, в которой учитывалось бы влияние придомовых стоянок и парковок на формирование транспортных потоков. Сформулированы задачи и вопросы, решение которых позволят получить более точные результаты интенсивности транспортных потоков.*

Обсуждение и заключение. *Усовершенствованная транспортная модель г. Тулы позволит составить прогноз для определения основных параметров работы транспортной системы с учетом динамики выезда транспортных средств с придомовых территорий в разные интервалы времени суток. Предложенный методический инструментарий и алгоритм решения задачи загрузки улично-дорожной сети в квазидинамической постановке поможет в решении существующих транспортных проблем и совершенствовании организации дорожного движения.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *моделирование транспортных потоков, стоянки и парковки, придомовые территории.*

Поступила 23.10.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Агуреев И.Е., Юрченко Д.А. Постановка задачи о загрузке удс города с учетом данных о функционировании придомовых стоянок автомобилей. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 670–679. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679

© Агуреев И.Е., Юрченко Д.А.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679

FUNCTIONING OF THE CAR PARKING PLACES NEAR HOUSES: FORMULATION OF THE PROBLEM OF THE ROAD CITY NETWORK

Igor E. Agureev, Dmitry A. Yurchenko
Tula State University,
Tula, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The load models of the road network make it possible to understand a lot of the transport, social, environmental, and other city problems. Creating transport models requires knowledge of the traffic flows' formation and functioning. The paper formulates a goal and poses tasks for the research conducting of the adjoining territories of residential areas in Tula as one of the urban traffic flows' sources and of the identifying patterns of the parking places near houses' influence on the road network loading.*
Materials and methods. *The basis of the research was the development in the field of predictive simulation of automobile transport systems. The authors used complex of computer-aided design "TransNet", which allowed adjusting the initial data in the base model by the results of the parking places' functioning.*
Discussion and conclusions. *As a result, the improved transport model of Tula allows making the forecast for determining the main parameters of the transport system taking into account the dynamics of vehicles' local area departure at different time intervals. Moreover, the proposed methodological tools and algorithm for solving the problem of the road network loading in a quasi-dynamic setting helps to solve existing transport problems and to improve the traffic organization.*

KEYWORDS: *traffic flow modeling, parking, house adjoining territories.*

Submitted 23.10.2019, revised 17.12.2019.
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: Agureev Igor E., Yurchenko Dmitry A. Functioning of the car parking places near houses: formulation of the problem of the road city network. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 670–679 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-670-679

© Agureev I.E., Yurchenko D.A.

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

ВВЕДЕНИЕ

Удовлетворение спроса пользователей, т. е. обеспечение перемещения нужного количества грузов и пассажиров, является главным назначением улично-дорожной сети[1] [1, 2]. Процесс передвижения автотранспортных средств по улично-дорожной сети (УДС) представляет собой достаточно разнообразное и сложное явление, что обусловлено множеством факторов, а именно: количеством и качеством транспортных средств, дорожными условиями, психологическими качествами и опытом водителя и пр. Повышение требований, предъявляемых к качеству организации дорожного движения в городах, является фактором развития методов транспортного планирования, основанных на моделях «транспортного спроса». Такие модели могут быть улучшены за счет получения детальной динамики центров генерации отправлений (поездок). Поиск закономерностей, присущих автотранспортным потокам на одном и том же участке УДС в одни и те же отрезки времени характерных часов суток, является важной составляющей при изучении функционирования транспортных макросистем[2], одним из вариантов которых можно считать распределение автомобильного транспорта на УДС (равновесное случайное заполнение участков УДС транспортными средствами). При этом стоянки, парковки и др. источники и стоки транспорта в более широком смысле представляют собой, с позиции теории макросистем, отдельные аспекты состояний элементов (например, если автомобиль – это элемент системы, а состояние – принадлежность его конкретной транспортной зоне, то парковка – это и есть транспортная зона – источник транспортного потока (ТП)).

Очевидно, что динамика ТП тесно связана с динамикой источников и стоков транспорта. Отсюда следует необходимость и актуальность более глубокого изучения характера функционирования стоянок и парковок. Если функционирование отдельно расположенных стоянок и парковок изучено достаточно подробно[3] [3, 4, 5], то стоянки на придомовых территориях, стихийно возникающие в жилых городских районах, исследованы недостаточно, тогда как именно они являются значительным истоком транспортных средств на УДС в утренние часы. Целью данной работы является обоснование необходимости создания методики транспортного планирования для решения задач модернизации УДС и основанной на экспериментальной динамике функционирования стоянок и парковок индивидуальных транспортных средств. **Объектом исследования** является автотранспортная система г. Тулы, содержащая УДС, а также совокупность источников-стоков индивидуального транспорта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретической основой исследования являются разработки в области прогнозного имитационного моделирования автомобильных транспортных систем (АТС), методы решения задачи загрузки УДС, теория макросистем, а также методы экспериментальных исследований транспортных систем и анализа данных.

Мощным инструментом для исследования транспортной системы является использование моделей функционирования объектов этих систем. Модели «транспортного спроса» служат одним из средств для эффективного решения следующих задач в области организации жизненного пространства крупных городов[4,5] [6, 7, 8]:

- *внесение* изменений в функционирование городской транспортной системы в случае изменения внешних транспортных связей (например, строительство объездной дороги и вывод транзитных автомобильных потоков за пределы города или вынос крупных объектов тяготения за городскую черту);
- изменение работы транспортной системы с введением в эксплуатацию новых элементов дорожной сети;
- сохранение транспортных условий в транспортной системе города при строительстве нового жилого района или изменения расположения центра тяготения с большой емкостью;

[1] Попков Ю.С. Теория макросистем. Равновесные модели. Стереотип. 2015. 320 с.

[2] Попков Ю.С. Теория макросистем. Равновесные модели. Там же.

[3] Малоян Г.А. Основы градостроительства. М. : Ассоциации строительных вузов, 2004. 120 с.

[4] Алиев А.М., Попков Ю.С., Швецов В.И. Компьютерные модели развития города. СПб. : Наука, 2003. 78 с.

[5] Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. Логос, 2013. 159 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

- изменение распределения ТП при временном закрытии или ликвидации какого-то элемента транспортной системы;
- отражение на работе транспортной системы различных ограничений на передвижение по городской УДС;
- эффект от создания и развития автоматизированных систем управления дорожным движением;
- эффект от совершенствования элемента УДС (выполнение перепланировки транспортных узлов, расширение и обустройство проезжей части городских улиц и т.п.);
- влияние изменений в организации дорожного движения на пропускную способность улиц (например, введение ограничений на направления движения автомобилей, оптимизация работы светофорных узлов и т.п.).

При решении любых из перечисленных задач обязательно возникает необходимость расчета количества автомобилей, находящихся на УДС. Такой расчет может быть сделан различными способами, при этом погрешность решения данных задач высока (часто не ниже 20%). Для повышения точности моделирования требуется переход к динамической постановке, а также необходимость более глубокого изучения характера функционирования источников и стоков транспорта как функций времени (в том числе стоянок и парковок). Повышение точности прогнозирования в предлагаемой модели требует более полной детализации графовой модели УДС за счет увеличения числа узлов и дуг. В этом случае на графе появляются жилые кварталы города с придомовыми территориями и именно они являются основными источниками транспортных средств в утренние часы, а не промышленные предприятия, торгово-развлекательные центры, банки, офисы, учебные заведения и пр. В расчетах обычно используются допущения, учитывающие населенность транспортного района и уровень автомобилизации в данном городе. Моделирование потоков на УДС в конкретный интервал времени требует уточненного анализа числа автомобилей в сети, поэтому представляется важным уточнить традиционную постановку задачи о загрузке УДС.

Применение транспортных моделей невозможно без использования принципов компьютерного моделирования ТП. Одним из немногих программных продуктов транспортного моделирования, применяющихся при решении задач прогнозирования транспортного спроса, градостроительных задач, является разработанный учеными Института системного анализа РАН программно-аналитический комплекс (ПАК) «TransNet»[6]. Объектами моделирования «TransNet» служат ТС крупных городов и городских агломераций, а основное назначение комплекса заключается в прогнозировании интенсивности автомобильных и пассажирских потоков в транспортных сетях. ПАК «TransNet» *позволяет* решить указанные ниже основные типы задач:

1. Предложения по изменению и оценке городской градостроительной ситуации:
- рекомендации по размещению новых жилых или иных районов, оптимизация ёмкости уже существующих районов;
- оптимизация размещения объектов притяжения населения;
- выявление доступности различных территорий относительно жилых районов, мест труда и иных объектов притяжения;
- нахождение удельного веса различных пользователей в ТП, заполняющем дугу на графе.

2. Предложения по изменению в структуре транспортной системы:
- влияние ввода в эксплуатацию новых участков УДС, изменение характеристик участков;
- влияние внесения изменений в городские сети пассажирского транспорта;
- влияние временного или постоянного закрытия некоторых участков УДС.

3. Предложения по изменению в организации дорожного движения:
- влияние увеличения или уменьшения интервалов движения общественного пассажирского транспорта;
- влияние ведения одностороннего движения на отдельных участках УДС города;
- влияние ведения различных ограничений на проезд (скоростных и др.);
- влияние изменений в организации дорожного движения в узлах УДС.

Перечисленные задачи полностью соответствуют задачам, которые решаются при построении любой транспортной модели (приведены выше).

Результатами моделирования в среде «TransNet» являются:
- матрицы корреспонденций между различными районами города для различных ви-

[6] Швецов В.И. TransNet. Инструкция пользователя. М. : ИСА РАН. 2012. 249 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

дов транспорта в любые интервалы времени суток;

- распределение корреспонденций в АТС по конкретным путям;
- полные ТП на всех элементах сети;
- время и скорости передвижений по каждой дуге и для каждого поворота;
- различные параметры, характеризующие работу транспортной сети.

Теоретические и экспериментальные исследования по созданию базовой модели загрузки УДС г. Тулы приведены в работах [9, 10, 11], где для обработки результатов экспериментальных исследований применялся ПАК «TransNet». Распределение автомобильных потоков осуществлялось с использованием принципа равновесного распределения нескольких классов пользователей в транспортной системе. Принцип равновесного распределения является основным при компьютерном моделировании загрузки транспортной системы, он однозначно определяет ТП на дугах сети, так называемый принцип «дуговых алгоритмов». Используемый в ПАК «TransNet» метод Франка-Вульфа, описание которого приведено в [12, 13], является наиболее распространенным дуговым алгоритмом.

В соответствии с приказом Министерства транспорта РФ от 13 ноября 2018 г. № 406 «Об утверждении классификации работ по организации дорожного движения и о внесении изменений в классификацию работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог, утвержденную приказом Минтранса России от 16 ноября 2012 г. № 402» при моделировании ТП проводятся следующие работы:

- предварительный анализ и выбор средств программного обеспечения для моделирования;
- сбор и подготовка исходных данных для построения модели;
- ввод полученных данных в модель;
- верификация модели;
- валидация модели;
- выполнение экспериментов, интерпретация и анализ их результатов;
- прогнозирование и построение модели перспективной ситуации (при необходимости);
- формирование отчетных материалов;
- сопровождение модели, актуализация данных.

Важнейшим пунктом из этого перечня работ является сбор и подготовка исходных данных для моделирования, который включает в себя выполнение следующих мероприятий:

- выявление и размещение точек притяжения, а именно: мест проживания и приложения труда населения города, мест культурно-бытового обслуживания и др.
- определение количества отправлений/прибытий из/в источников/стоков автотранспорта;
- описание улиц и дорог, составляющих транспортную сеть района, включающее в себя характеристики проезжих частей, организацию дорожного движения;
- описание маршрутов следования и остановочных пунктов общественного пассажирского транспорта с интервалами отправления и др.

Корректировка исходных данных в уточняемой базовой транспортной модели, их уточнение учетом автомобилей, покидающих придомовые стоянки в утренние часы, составляет одну из задач предстоящего исследования о загрузке УДС г. Тулы. Решение это делится на следующие этапы:

1) создание графовой модели УДС и описание ее характеристик;

2) построение матрицы корреспонденций и дополнительных матриц (расстояний, длин);

3) последовательное решение задачи о загрузке УДС с калибровкой полученных результатов;

4) представление результатов расчетов в виде картограмм, графиков, таблиц;

5) проведение анализа результатов расчетов, формулировка выводов и предложений.

Графовая модель (рисунок) составлена на основе карты г. Тулы с соблюдением геометрии УДС, созданию графа предшествовало:

- обследование улиц и дорог транспортной сети;
- выявление основных выездов из города (шоссе), определение по нормативным документам их категорий;
- выявление магистральных улиц и улиц внутрирайонного значения;
- составление характеристик улиц и дорог;
- разделение исследуемой территории на условные транспортные районы.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Рисунок – Граф УДС г. Тулы с обозначением объектов притяжения

Figure – Graph of the Tula's road network with the objects' designation

Этап построения матриц включает в себя создание:

- матрицы расстояний – элементы этой матрицы показывают в километрах кратчайшие расстояния между районами;
- матрицы дальностей обобщенных цен – каждый элемент матрицы содержит данные о времени в минутах, затраченном на преодоление пути между районами. Базируется на матрице межрайонных расстояний и ценовых функциях узлов и перегонов;
- матрицы корреспонденций – элементы матрицы показывают общий объем передвижений между районами (независимо от конкретных маршрутов передвижения). Экспортируется в программу как поэлементный список.

Расчет матрицы корреспонденций проводился с помощью запросов, построенных на языке SQL, для базы данных, сформированной по информации о проживании и местах работы населения г. Тулы.

Усовершенствование базовой модели загрузки УДС г. Тулы для отдельных ее участков, объектов, районов требует проведения калибровки модели. Поэтому следующим шагом является детализация и уточнение исходных данных, которые могут быть получены при изучении условий формирования ТП от придомовых территорий, расположенных внутри транспортных районов [14, 15]. Выполнение указанных действий составляет суть предлагаемых изменений в транспортную постанов-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ку задачи о загрузке УДС. Необходимо дать ответы на следующие вопросы, касающиеся характеристик стоянок, возникающих на придомовых территориях:

- размещение, емкость и наполнение стоянок автомобилями;
- характер изменения наполнения стоянок по времени суток;
- влияние стоянок на транспортную загрузку прилежащих улиц по часам суток в рабочие дни.

Для получения ответов на поставленные вопросы требуется решить следующие задачи:

- выбрать метод и способы проведения экспериментального исследования придомовых территорий;
- составить план и программу исследования;
- выполнить анализ жилых районов в Пролетарском, Зареченском, Советском и Центральном административных округах г. Тулы с позиций определения территорий с наибольшей жилой застройкой и высокой плотностью населения, являющиеся истоками образования ТП;
- выявить производственно-торговые предприятия, учебные учреждения, объекты культурно-бытового назначения и др., служащие центрами притяжения, являющиеся стоками ТП;
- определить месторасположение и границы объектов обследования в каждом районе;
- определить расстояния между предполагаемыми источниками и стоками ТП;
- дать характеристику каждому объекту: количество домов, подъездов, квартир, парковочных мест, въездов/выездов;
- зафиксировать для каждого объекта количество припаркованных транспортных средств в вечернее и ночное время суток;
- зафиксировать для каждого объекта количество выезжающих автомобилей из дворовой зоны с 6:00 ч. до 11:00 ч.
- определить транспортную загрузку окружающих улиц при выезде/въезде из обследуемых объектов в утренние часы суток;
- выполнить анализ полученных результатов экспериментальных обследований и выявить закономерности влияния стоянок придомовых территорий на формирование ТП;
- определить этап и место в алгоритме расчета модели транспортной сети, которые потребуют корректировки;
- внести необходимые изменения и тем самым провести калибровку модели загрузки УДС г. Тулы.

Среди указанных выше в рамках выполняемого исследования в настоящее время реализованы и методически обеспечены задачи, описанные в работах[7,8] [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе обоснована потребность в уточнении базовой методики определения загрузки городской УДС, в которой учитывалось бы влияние на формирование ТП стоянок и парковок, расположенных на придомовых территориях. Основным отличием предлагаемой методики от традиционной является квазидинамический характер постановки задачи, в которой учитываются реальные зависимости от времени для интенсивностей транспортных потоков придомовых территорий как источников транспорта. Сформулированы задачи и вопросы, решение которых позволят получить более точные результаты интенсивности ТП.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование в рамках выполненной постановки задачи и с учетом предлагаемых изменений в методику расчета интенсивности автомобильных потоков, находящихся на УДС, позволит составить прогноз основных параметров работы транспортной системы с учетом динамики выезда транспортных средств с придомовых территорий, а именно:

- общие объемы передвижений автомобилей между различными транспортными районами;
- интенсивность автомобильных и пассажирских потоков на всех элементах транспортной сети;
- перегруженность улиц и дорог;
- затраты времени на передвижение между районами, средние скорости и др.

[7] Агуреев И.Е., Юрченко Д.А. Формирование транспортных потоков в жилых районах города Тулы как источниках транспорта // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта науч.-практ. конф. Тула : Тульский государственный университет, 2019. С. 43–51.

[8] Юрченко Д.А. Моделирование загрузки городской улично-дорожной сети с учетом динамики стоков и истоков автомобильного транспорта // Наука и образование: Сохраняя прошлое, создаем будущее науч.-практ. конф. Пенза : VWYC Наука и Просвещение, 2019. Ч. 1. С. 86–91.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Отметим, что такие прогнозы могут быть составлены для произвольного времени суток и практически для любого отрезка времени в рамках решения различных задач транспортного моделирования [17-21]. Сам прогноз может относиться как к текущему горизонту событий, так и к перспективным. Измеренная динамика формирует процесс загрузки УДС, и знание деталей этой динамики позволяет произвести уточнение общепринятой методики [22-25]. Результаты выполненного эксперимента уже представлены в работе [16], которая детально демонстрирует особенности процесса функционирования придомовой территории как источника транспорта.

Обработка результатов экспериментальных исследований средствами программного комплекса «TransNet» позволит получить картину загрузки УДС г. Тулы, рекомендовать мероприятия по ее совершенствованию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корчагин В.А., Ляпин С.А. Управление процессами перевозок в открытых социо-природно-экономических автотранспортных системах: монография. Липецк: ЛГТУ, 2007. 261 с.

2. Paluch S. Transportation network reduction. Transport problems. V 10, I 2, 2015, pp. 69–74.

3. Зедгенизов А.В., Зедгенизова А.Н. Особенности сбора исходных данных при оценке числа припаркованных автомобилей возле жилых объектов // Вестник ИрГТУ. 2011. № 12 (48). С. 105–108.

4. Steiner S. Strategic framework of transport development. Transport problems.: Tom 2, Zeszyt 1, 2009. pp. 5–14.

5. Tom V. Mathew, K V Krishna Rao. Introduction to Transportation Engineering. TRIP GENERATION NPTEL. May 24, 2006.

6. Холодов Я.А., Холодов А.С., Гасников А.В., Морозов И.И., Тарасов В.Н. Моделирование транспортных потоков, актуальные проблемы и пути их решения // Труды МФТИ. 2010. № 4(8). Т. 2. С. 152–162.

7. Carteni A. Urban sustainable mobility. Part 1: rationality in transport planning. Transport problems.: V 2, 4. 2014. pp. 39–48.

8. Schiller C. Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum - und Infrastrukturplanung – Chancen für eine integrierte Stadt- und Verkehrsplanung (2009). In Tagungsband AMUS 2009, RWTH Aachen, Aachen 24.

9. Агуреев И.Е., Пышный В.А., Швецов В.И. Моделирование загрузки улично-дорожной сети г. Тулы // Тула: Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 112–138.

10. Агуреев И.Е., Митюгин В.А., Пышный В.А. Подготовка и обработка исходных данных для математического моделирования автомобильных транспортных систем // Тула: Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 6. С. 119–127.

11. Агуреев И.Е., Богма А.Е., Пышный В.А. Динамическая модель транспортной макросистемы // Тула: Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 139–145.

12. Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 148–157.

13. Popa M. On transport network reliability // Transport problems. 2012. V 7, I 3. Pp. 127–134.

14. Мазурин Д.С., Швецов В.И. Структура данных для калибровки транспортной модели города // Труды ИСА РАН. 2015. Т. 65. № 1. С. 16–23.

15. Train K.E. Discrete Choice Methods with Simulation. Cambridge Books. 2nd edition. Cambridge University Press, 2009.

16. Агуреев И.Е., Юрченко Д.А. Обследование придомовых территорий городских жилых районов как источников формирования автомобильного транспорта // Мир транспорта и технологических машин. Орел: Издательство Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, 2018. С. 82–88.

17. Baruah A.K., Traffi Control Problems using Graph Connectivity // International Journal of Computer Applications. V.86. № 11, 2014.

18. Bisen S.K., Application of Graph Theory in Transportation Networks // International Journal of Scientific Research and Management. № 5 (07), 2017. pp. 6197–6201.

19. Kutil M. Modeling and Optimization of Traffic Flow in Urban Areas. Doctoral Thesis, Prague, January 2010.

20. Thathsarani A.A.T., Lanel G.H.J. A Model To Reduce Traffi Congestion In Colombo City // International Journal of Scientific and Research Publications. № 9 (6). 2019.

21. Yamuna M., Raza A., Kanav A.K., Sakthi K.P., Sangam K. Traffi Control System using Maximum Flow Algorithm // International Journal of Current Engineering and Technology. № 6 (5). 2016.

22. Bin R., Boyce D. Modeling Dynamic Transportation Networks: An Intelligent Transportation System Oriented Approach. Springer, 1996.

23. Ukkusuri S.V., Ozbay K. Advances in Dynamic Network Modeling in Complex Transportation Systems. Springer Science & Business Media, 2013.

24. Patriksson M. The Traffi Assignment Problem: Models and Methods. Courier Dover Publications, 2015.

25. Ortúzar J.D., Willumsen L.G. Modelling transport. JohnWilley & Sons, 2011.

REFERENCES

1. Korchagin V.A., Ljapin S.A. *Upravlenie processami perevozok v otkrytyh socio-prirodno-jekonomicheskih avtotransportnyh sistemah: monografija* [Management of transportation processes in open socio-natural-economic road transport systems]. Lipeck: LGTU, 2007: 261 (in Russian).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

2. Paluch S. Transportation network reduction. *Transport problems*. 2015; V 10, I 2: 69–74.

3. Zedgenizov A.V., Zedgenizova A.N. Osobennosti sbora ishodnyh dannyh pri ocenke chisla pripar-kovannyh avtomobilej vozle zhilyh ob'ektov [Features of the collection of source data when assessing the number of parked cars near residential objects]. *Vestnik IrGTU*. 2011; 12 (48): 105–108 (in Russian).

4. Steiner S. Strategic framework of transport development. Transport problems.: Tom 2, Zeszyt 1, 2009. pp. 5–14.

5. Tom V. Mathew, K V Krishna Rao. Introduction to Transportation Engineering. TRIP GENERATION NPTEL. May 24, 2006.

6. Holodov Ja.A., Holodov A.S., Gasnikov A.V., Morozov I.I., Taracov V.N. Modelirovanie transport-nyh potokov aktual'nye problemy i puti ih reshenija [Modeling of traffi flows - actual problems and ways of their solution]. *Trudy MFTI*. 2010; 4(8), T. 2: 152–162 (in Russian).

7. Carteni A. Urban sustainable mobility. Part 1: rationality in transport planning. *Transport problems*. 2014; V 2, 4: 39–48.

8. Schiller C. Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum - und Infrastruktur-planung – Chancen für eine integrierte Stadt- und Verkehrsplanung (2009). In Tagungsband AMUS 2009, RWTH Aachen, Aachen 24.

9. Agureev I.E., Pyshnyj V.A., Shvecov V.I. Modelirovanie zagruzki ulichno-dorozhnoj seti g. Tuly [Modeling the load of the road network in Tula]. *Tula: Izvestija TulGU*. Tehnicheskie nauki. 2013; 6. Ch. 2: 112–138 (in Russian).

10. Agureev I.E., Mitjugin V.A., Pyshnyj V.A. Podgotovka i obrabotka ishodnyh dannyh dlja matema-ticheskgo modelirovanija avtomobil'nyh transportnyh sistem [Preparation and processing of input data for mathematical modeling of automobile transport systems]. *Tula: Izvestija TulGU. Tehicheskie nauki*. 2014;6: 119–127 (in Russian).

11. Agureev I.E., Bogma A.E., Pyshnyj V.A. Dinamicheskaja model' transportnoj makrosistemy [Dynamic model of a transport macrosystem]. *Tula: Izvestija TulGU*. Tehnicheskie nauki. 2013: 6. Ch. 2: 139–145 (in Russian).

12. Shvecov V.I. Algoritmy raspredelenija transportnyh potokov [Algorithms for the distribution of traffi flows]. *Avtomatika i Telemehanika*. 2009; 10: 148–157 (in Russian).

13. Popa M. On transport network reliability. *Transport problems*. 2012; 7, I 3: 127–134.

14. Mazurin D.S., Shvecov V.I. Struktura dannyh dlja kalibrovki transportnoj modeli goroda [Data structure for calibrating the transport model of the city]. *Trudy ISA RAN*. 2015; 65. № 1: 16–23 (in Russian).

15. Train K.E. Discrete Choice Methods with Simulation. Cambridge Books. 2nd edition. Cambridge University Press, 2009.

16. Agureev I.E., Jurchenko D.A. Obsledovanie pridomovyh territorij gorodskih zhilyh rajonov kak istochnikov formirovanija avtomobil'nogo transporta [Inspection of the adjacent territories of urban residential areas as sources of the formation of automobile transport]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin.* Orel: Izdatel'stvo Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta im. I.S. Turgeneva. 2018: 82–88 (in Russian).

17. Baruah A.K., Traffi Control Problems using Graph Connectivity. *International Journal of Computer Applications*. 2014; V.86. № 11.

18. Bisen S.K., Application of Graph Theory in Transportation Networks. *International Journal of Scientific Research and Management*. 2017; 5 (07): 6197–6201.

19. Kutil M. Modeling and Optimization of Traffic Flow in Urban Areas. Doctoral Thesis, Prague, January 2010.

20. Thathsarani A.A.T., Lanel G.H.J. A Model To Reduce Traffi Congestion In Colombo City. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2019; 9 (6).

21. Yamuna M., Raza A., Kanav Anand K., Sakthi K. P., Sangam K. Traffi Control System using Maximum Flow Algorithm. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2016; 6 (5).

22. Bin R., Boyce D. Modeling Dynamic Transportation Networks: An Intelligent Transportation System Oriented Approach. Springer, 1996.

23. Ukkusuri S.V., Ozbay K. Advances in Dynamic Network Modeling in Complex Transportation Systems. Springer Science & Business Media, 2013.

24. Patriksson M. The Traffi Assignment Problem: Models and Methods. Courier Dover Publications, 2015.

25. Ortúzar J.D., Willumsen L.G. Modelling transport. JohnWilley & Sons, 2011.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Статья была подготовлена совместно с заведующим кафедрой ТулГУ «Автомобили и автомобильное хозяйство» Агуреевым Игорем Евгеньевичем в рамках научной деятельности кафедры.

Юрченко Дмитрий Алексеевич. Обоснование методов исследования. Вклад соавтора составляет 70%.

Агуреев Игорь Евгеньевич. Формулировка задач исследования. Вклад соавтора составляет 30%.

AUTHORS` CONTRIBUTION

The article was prepared jointly with Igor E. Agureev, the Head of the Department of the Motor Transport and Motor Industry in Tula State University as part of the scientific activities of the department.

Dmitry A. Yurchenko – justification of research methods; contribution of the co-author is 70%.

Igor E. Agureev – formulation of the problem; contribution of the co-author is 30%.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., ТулГУ «Тульский государственный университет», заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» (г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: agureev-igor@yandex.ru).*

Юрченко Дмитрий Алексеевич – аспирант, ТулГУ «Тульский государственный университет» (г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: yurchenkodmitry@me.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor E. Agureev – Dr of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of the Motor Transport and Motor Industry, Tula State University (Tula, 92, Lenin Ave., e-mail: agureev-igor@yandex.ru).*

Dmitry A. Yurchenko – Graduate Student, Tula State University (Tula, 92, Lenin Ave., e-mail: yurchenkodmitry@me.com).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 656.13
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРОГРАММЫ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СЕТЕЙ И ПОТОКА НАСЫЩЕНИЯ

А.Н. Новиков[1], С.В. Еремин[1], А.Г. Шевцова[2]
[1]Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия;
[2]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В статье рассмотрены вопросы светофорного регулирования. Эта задача всегда остается актуальной. Так, даже для несложного перекрестка, в зависимости от интенсивности транспортных потоков, такты регулирования должны существенно различаться. В данной статье рассмотрены возможные схемы регулирования, а именно: двухфазная, трехфазная, четырехфазная и другие. Кроме того, для решения задачи оптимизации регулирования предлагается использовать аппарат управляемых сетей, который позволяет задать конфигурацию транспортной сети в виде базового графа управляемой сети, а затем на основании параметризации этого графа пропускными способностями сети решать задачи оптимизации выбора управления транспортными и пешеходными потоками.*

Методы и материалы. *В данной работе для решения задачи управления транспортными потоками на улично-дорожной сети предлагается использовать механизмы управляемых сетей. В результате исследований авторами предлагается методика, основанная на расчете потоков насыщения, основной характеристикой при такой методике управления является так называемый основной режим работы, который включается в том случае, когда нет запросов от детекторов транспорта на включение зеленого сигнала.*

Результаты. *Авторами построена обобщенная имитационная модель управления фазами регулирования, основанная на использовании механизма управляемых сетей в зависимости от интенсивности транспортных потоков, и сформирована методика выбора режимов работы светофора для различных дорожных ситуаций.*

Заключение. *Показано, что решение задачи светофорного регулирования существенно влияет на эффективность управления дорожным движением. На основании анализа методов светофорного регулирования в работе определены основные параметры, входящие в состав каждого из них. В результате расчета потока насыщения и информации об интенсивности дорожного движения сформирована методика выбора необходимых режимов работы светофорного объекта.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *транспортная сеть, светофорный объект, параметры расчета, перекресток, поток насыщения, управляемая сеть.*

Поступила 29.10.2019, принята к публикации 17.12.19.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: 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;16(6): 680–691. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691

© Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691

PROGRAM OF LIGHT-FORMAT REGULATION ON THE BASIS OF CONTROLLED NETWORKS AND THE SATURATIONS' FLOW: BASIC PRINCIPLES OF CALCULATION

Alexander N. Novikov[1], Sergey V. Eremin[1], Anastasia G. Shevtsova[2]
[1]Orel State University named after I.S, Turgeneva, Orel, Russia;
[2]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, Belgorod, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The paper deals with traffic light regulation. This task is always relevant. Thus, even for an ordinary intersection, depending on the intensity of traffic flows, the control cycles should differ significantly. This paper discusses all kinds of systems, namely, two-phase, three-phase, four-phase and others. In addition to solving optimization problems of regulation the authors propose to use the device managed network, which allows setting the configuration of the transport network as the base graph of the managed network, and then based on the parameterization of the graph of the throughput ability of the network to solve the optimization problem of selecting the control traffic and pedestrian flow.*
Methods and materials. *For solving the problem of traffic management on the road network, the authors proposed to use the mechanisms of managed networks. As a result, the authors presented a technique based on the calculation of saturation flows, the main characteristic of the control technique, which was activated when there were no requests from the transport detectors to turn by the green signal.*
Results. *The authors constructed a generalized simulation model of control phases of regulation based on the usage of controlled networks, depending on the intensity of traffic flows and formed a method of selecting modes of traffic lights for different traffic situations.*
Discussion and conclusions. *The solution of the problem of traffic light regulation significantly affects the traffic management efficiency. The authors determine the main parameters based on the analysis of traffic light control methods. As a result of the calculation of the saturation flow and information about the intensity of traffic, the authors form the method of selecting the necessary modes of the phosphor object's operation.*

KEYWORDS: *transport network, traffic light object, calculation parameters, intersection, saturation flow, managed network.*

Submitted 29.10.2019, revised 17.12.2019.
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: Novikov Alexander N., Eremin Sergey V., Shevtsova Anastasia G. Program of light-format regulation on the basis of controlled networks and the saturations' flow: basic principles of calculation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 680-691 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691

© Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G.

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

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью устройства светофорного регулирования на перекрестке является разделение транспортных и пешеходных потоков во времени путем включения разрешающего или запрещающего сигнала светофора для определенной группы участников дорожного движения [1, 2, 3]. В зависимости от вида перекрестка и типа светофорного регулирования можно частично либо полностью избежать появления конфликтных точек.

Как правило, светофорные объекты устраиваются для повышения уровня безопасности дорожного движения, а также для увеличения пропускной способности и уровня обслуживания транспортных потоков. В качестве дополнительных решаемых задач можно привести следующие:

1. Улучшение условий движения общественного транспорта.

2. Защита и увеличение уровня обслуживания для пешеходов и велосипедистов.

3. Направление движения транспортных средств в целом в сети.

4. Защита участков улично-дорожной сети от перегрузок.

Цели устройства светофорного регулирования должны соответствовать в первую очередь потребностям, интересам и требованиям отдельных групп участников дорожного движения. В процессе проектирования светофорного регулирования необходима оценка нескольких вариантов схем организации движения при использовании светофорного регулирования с учетом безопасности дорожного движения, экономичности, пропускной способности и защиты окружающей среды. При этом требуется учитывать потребности всех групп участников дорожного движения и других заинтересованных лиц.

В связи с этим основной целью исследования является анализ основных схем пофазного разъезда на регулируемых участках и разработка нового подхода к оптимизации режимов управления (тактов регулирования) с использованием механизма управляемых сетей. Научная новизна исследования заключается в разработке подхода управления транспортными потоками на основании данных об интенсивности транспортного потока и потока насыщения и использовании основного режима работы светофорного объекта, который включается в том случае, когда нет запросов от детекторов транспорта на включение зеленого сигнала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для эффективной работы светофорного объекта необходимо понимать закономерности движения транспортных потоков. Важным является тот факт, что закономерности движения транспортного потока серьезно отличаются от велосипедного и пешеходного движения. В то время как для автомобильного транспорта главными критериями являются количество подъезжающих к перекрестку автомобилей и особенности проезда перекрестка (влияющие на пропускную способность), для пешеходного и велосипедного движения главными аспектами будут выбор маршрута на перекрестке и соблюдение требований сигналов светофора.

Движение транспортных потоков на регулируемом перекрестке описывают три показателя:

1. Закономерность прибытия транспортных средств к зоне перекрестка.

2. Закономерности убытия транспортных средств из зоны перекрестка.

3. Поведение участников дорожного движения при изменении фаз светофорного регулирования.

В отечественной литературе достаточно широко рассмотрены особенности движения автомобильных потоков[1] [4]. Кроме того, в [5, 6] рассмотрены и подходы для расчета светофорного регулирования на основе зарубежных норм и рекомендаций.

Также как при автомобильном и велосипедном движении интенсивность пешеходных потоков изменяется в течение дня. Однако необходимо учитывать, что в зависимости от окружающей инфраструктуры пешеходные потоки могут быть постоянными во времени (например, на перекрестках рядом с остановками общественного транспорта). Эти условия необходимо учитывать при проектировании светофорного объекта. При высокой интенсивности движения пешеходов площадь, занимаемая ими на площадке ожидания и на самом пешеходном переходе, значительно превышает обозначенные разметкой границы. Кроме этого, необходимо учитывать, что пе-

[1] Витвицкий Е.Е. Моделирование транспортных процессов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Министерство образования и науки РФ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»; Е.Е. Витвицкий. Омск, 2017.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

шеход обычно не стоит непосредственного у края полосы движения автомобилей и необходимо учитывать время, которое ему потребуется для достижения проезжей части.

При учете движения пешеходов в границах перекрестка необходимо разделять пешеходов, которым нужно перейти проезжую часть один раз, и пешеходов, которым необходимо перейти перекресток по диагонали. Часто пешеходы, которым нужно перейти перекресток по диагонали, предпочитают перейти проезжую часть вне перекрестка, в особенности когда перекресток генерирует продолжительные задержки.

Оценка резервов пропускной способности состоит в анализе уровня загрузки улично-дорожной сети. Уровень загрузки показывает отношение интенсивности движения к пропускной способности. В соответствии с «Руководством по проектированию городских улиц и дорог» пропускная способность проезжей части магистральных улиц с регулируемым движением ($P_{рег}$ (авт/ч)) определяется пропускной способностью проезжей части в сечении линии «стоп», расчет которой рекомендуется производить на основании соотношения

$$P_{рег} = \alpha \sum_{j=1}^{c} N_j \Big/ \sum_{j=1}^{b} q_j , \quad (1)$$

где α – суммарный фазовый коэффициент при полной нормальной загрузке регулируемого перекрестка, равный 0,9 при двухтактном, 0,85 при трехтактном и 0,8 при четырехтактном циклах регулирования; b – число основных циклообразующих направлений, требующих выделения полного такта; N_j – интенсивность по данному входу на перекресток, приведенных авт/ч; с – число возможных направлений движения с данного входа на перекресток при пересечении линии «стоп» (направо, прямо, налево); j – возможные направления движения по всем входам на перекресток.

От количества и распределения фаз на регулируемом перекрестке зависит уровень обслуживания и безопасность. Количество фаз выбирается в зависимости от формы пересечения, количества, направления и конфликтов транспортных потоков, а также от отдельных потоков автомобилей (рисунок 1). В общем случае транспортные потоки должны как можно меньше задерживаться.

Двухфазная система обслуживает максимальное количество транспортных потоков, левые повороты осуществляются через прямое встречное направление, преимущественно используется на малых пересечениях и применим при низких интенсивностях левоповоротных потоков.

Дополнительное время для левоповоротных потоков в конце фазы обозначается дополнительной секцией с зеленой стрелкой. Это правило для левоповоротных потоков: в конце фазы 1 встречное движение останавливается для обеспечения свободного проезда левоповоротным потокам [7, 8].

В четырехфазной системе левоповоротные потоки обозначаются отдельно, бесконфликтный проезд обозначается дополнительной секцией с зеленой стрелкой, применяется на больших пересечениях.

Трехфазные системы на примыканиях используются при слабых левоповоротных потоках прямого направления, при сильных также применяется отдельная фаза или дополнительное время для левоповоротных потоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из основных задач светофорного регулирования является перемещение максимально возможного количества транспортных средств за минимально возможное время. В общем случае эта задача многокритериальная и одним из вариантов ее решения будет максимизация транспортных и пешеходных потоков за заданное количество тактов N, которое соответствует некоторому временному интервалу (рисунок 2).

В рамках данного исследования для решения задачи управления транспортными потоками на УДС предлагается использовать механизмы управляемых сетей. Предполагается, что имеют место истоки (пункты отправления) ТС и стоки (пункты назначения). В плане формального описания задачи оптимизации управления потоками определяется множество вершин-источников I_0 и вершин-стоков I_1.

$$I_0 = \left\{ i_p : \sum_{j=1}^{L} a_{i_p j} = 0, 1 \le i_p \le L \right\}, \; I_1 = \left\{ j_p : \sum_{i=1}^{L} a_{i j_p} = 0, 1 \le j_p \le L \right\}. \quad (2)$$

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

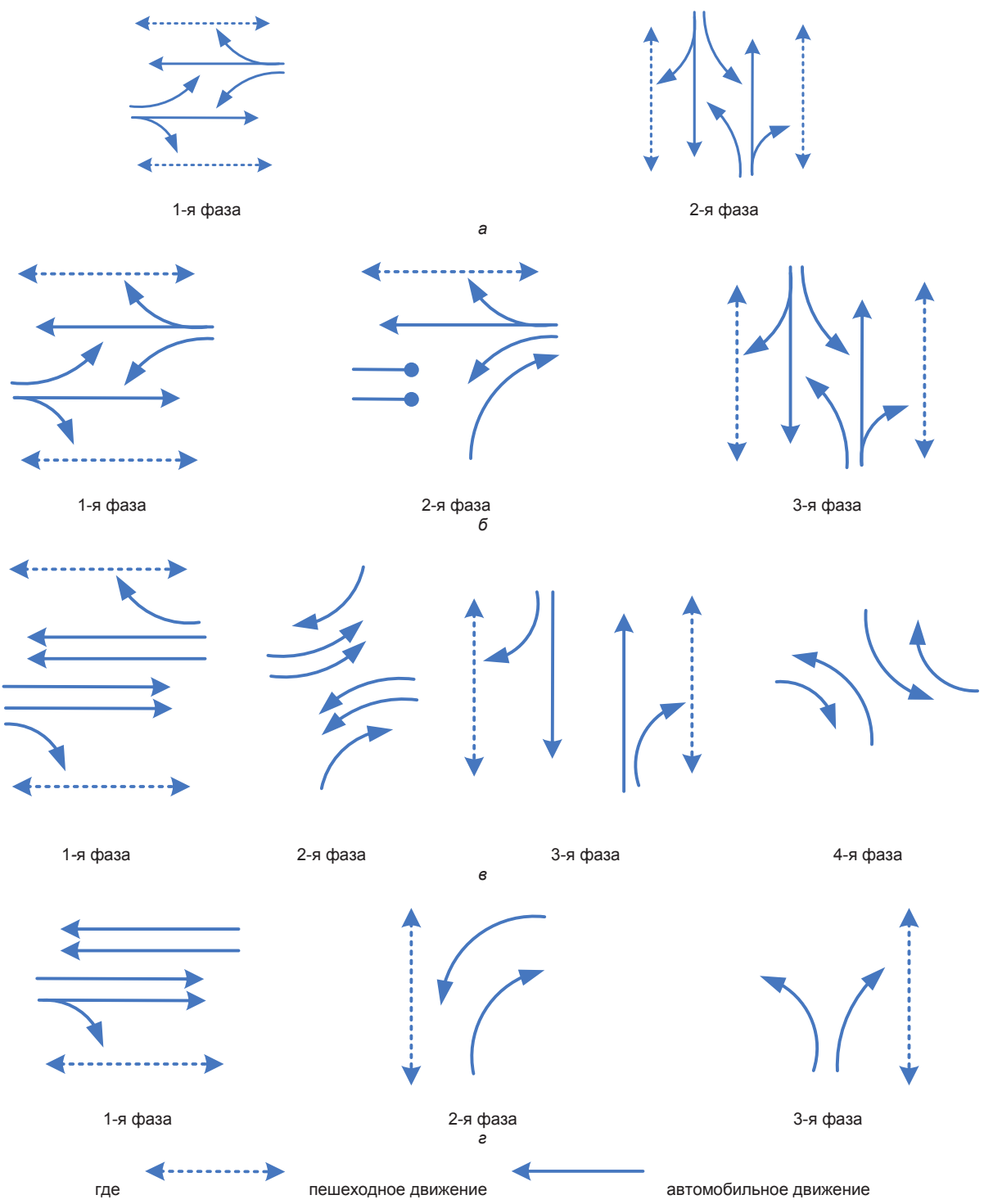


Рисунок 1 – Использование различных многофазных подходов к регулированию (а – двухфазная система, б – дополнительное время для левоповоротных потоков, в – четырехфазная система, г – трехфазные системы на примыканиях)

Figure 1-Use of different multiphase approaches to regulation (а – two-phase system, б – additional time for left-handed flows, в – four-phase system, г – three-phase adjacent systems)

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

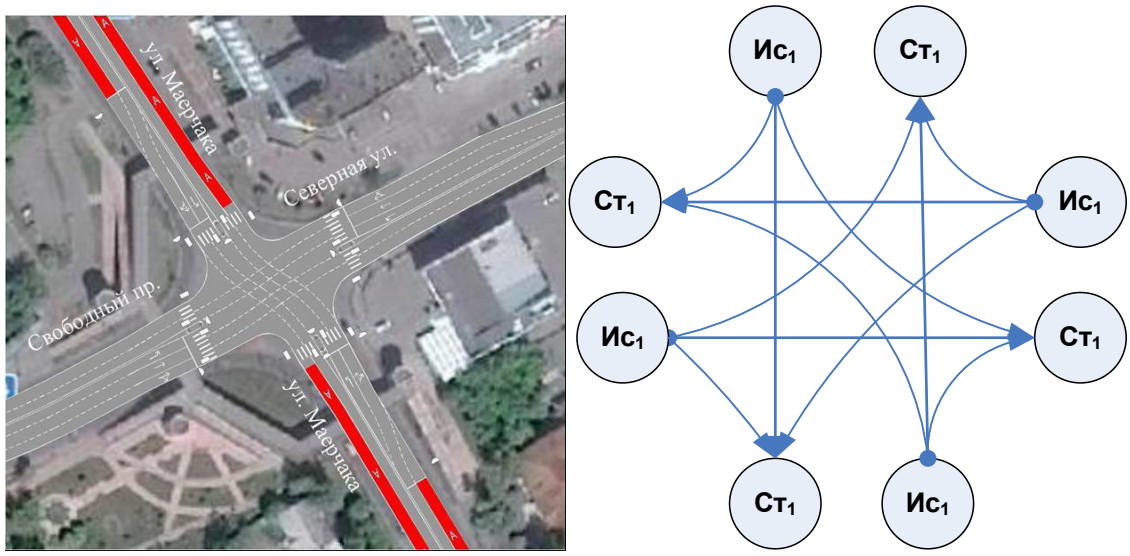


Рисунок 2 – Представление перекрестка в виде управляемой сети

Figure 2 – Representation of the intersection as a managed network

Вершина-источник управляемой сети не имеет входящих дуг (соответствующий столбец матрицы смежности равен нулю), а вершина-сток не имеет выходящих (соответствующая строка матрицы смежности равна нулю). Остальные вершины представляют произвольные внутренние вершины управляемой сети. Предполагается, что величина потока в вершинах сети кроме истоков ограничена следующими значениями: $x^+=[x_1^+,\ldots,x_L^+]^T$. При этом возможно, что $x_i^+=\infty$, $i\in I_0\cup I_1$.

Поиск оптимального управления в заданной сети сводится к формированию программного управления базовой конфигурацией сети u(.)=(u(1),u(2),…,u(*N*)), которая обеспечивает максимум потоку, задаваемого выражением

$$J(u(.))=\sum_{i\in I_1}x_i(N)-\sum_{i\in I_0}x_i(N)\to\max. \quad (3)$$

При этом на каждом такте должен быть выполнен ряд ограничений

$$x_i(k)\le x_i^+,\ i=\overline{1,L},\ k=\overline{1,N}. \quad (4)$$

Соотношение (2) определяет разность потоков в вершинах-стоков и вершинах-истоков в конечном такте *N* управления сетью. Таким образом, на каждом шаге должно быть выбрано управление ũ(.)=(ũ(1),ũ(2),…,ũ(*N*)), которое дает максимум этой функции.

В управляемой сети предполагается, что поток проходит через сеть, а управление им реализуется через задание определенной конфигурации на каждом такте. В общем случае эта конфигурация формируется на основе задания вектора управления

$$u=[u_1\ldots u_M]^T,\ u\in U=U_1\times U_2\times U_M, \quad (5)$$

где управление на каждом такте принадлежит подмножеству $u_i\in U_i=\{0,1,\ldots,u_i^+\}$, а ограничения $u_i^+\in Z_+,\ i=\overline{1,M}$.

Базовая сеть (базовый граф) определяется графом с заданной матрицей смежности

$$A=[a_{ij}],\ a_{ij}\in\{0,1\},\ i,j=\overline{1,L}, \quad (6)$$

где *L* – число вершин графа базовой сети.

Аналогичный расчет можно выполнить для более сложных сетей, для которых имеет место базовая конфигурация (рисунок 3).

Матрицы пропускных способностей B и распределений D имеют ненулевые элементы, располагающиеся в тех же позициях, где и ненулевые элементы матрицы смежности A базовой сети. Конкретные числовые значения этих ненулевых элементов в матрицах пропускных способностей и в матрице распределений определяются по конкретной сети городских дорог.

В результате использования такой алгоритмической модели управляемой сети имеется возможность проверить разные варианты управлений на базовом графе модели перекрёстка со светофорным регулированием и решить задачу оптимизации, например с использованием генетических алгоритмов.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета базовых показателей [9, 10] имеют место общепринятые методики (рисунок 4). Однако для более корректного учета пешеходного потока многие методики не подходят. В результате предлагается методика, основанная на расчете потоков насыщения.

Так, поток насыщения – максимальное количество транспортных средств, способное проехать в указанном направлении при заданной ширине проезжей части (или полосы для движения), заданном проценте поворачивающих транспортных средств, заданном радиусе поворота [11]. При этом потоки насыщения в заданном направлении и определенной фазе вычисляются на основании соотношения

$$Мн_{ij} = Мн_{ij}^{прямо} \frac{100}{a + 1.75 \times b + 1.25 \times c} \times K, \quad (7)$$

где *j* – номер направления; *i* – номер фазы; $В_{пч}$ – ширина проезжей части в данном направлении данной фазы; $Мнij^{прямо}=525 \times B_{пч}$ – поток насыщения в прямом направлении; *a, b* и *c* – интенсивности транспортных потоков прямо, налево и направо соответственно в процентах от общей интенсивности; *K* – поправочный коэффициент.

Далее рассчитывается фазовый коэффициент, который представляет требуемое время для пропуска конкретного направления в определенной фазе в процентах по отношению к продолжительности всего цикла регулирования. Для величины фазового коэффициента справедливо соотношение

$$y_{ij} = \frac{N_{ij}}{M_{нij}}, \quad (8)$$

где N_{ij} – вычисленные интенсивности потоков в заданной фазе и в заданном направлении, ед./ч; $M_{нij}$ – поток насыщения в определенной фазе и в определенном направлении, ед./ч.

Далее выполняется расчет длительности промежуточных тактов, которые задаются интервалом времени между желтым сигналом текущей фазы и зеленым последующей фазы. Для каждой фазы длительность промежуточного такта определяется на основании соотношения

$$t_{nj} = \frac{v_a}{7.2a_m} + \frac{3.6 \times (l_i + l_a)}{v_a}, \quad (9)$$

где v_a – определяет усредненную скорость автотранспорта при подходе к пересечению и в его зоне без торможения, наиболее часто эта скорость принимается равной 50 км/ч для прямого направления и 25 км/ч для поворотного,

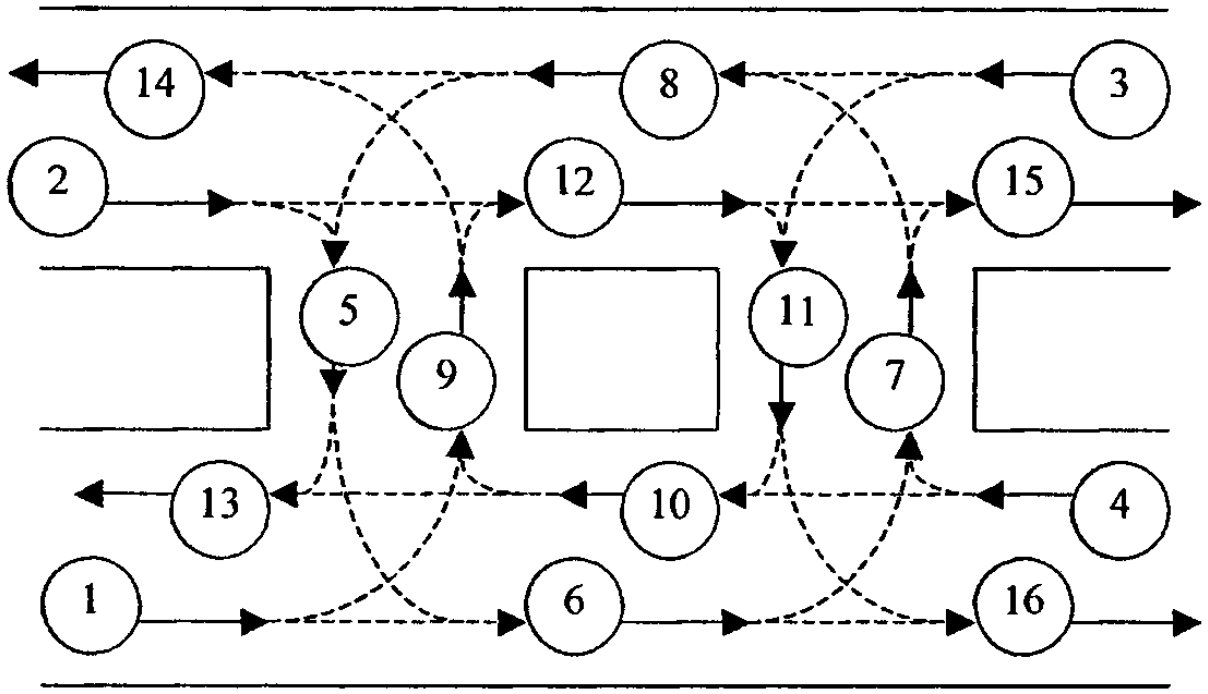


Рисунок 3 – Структура сложного перекрестка

Figure 3 – Structure of a complex intersection

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

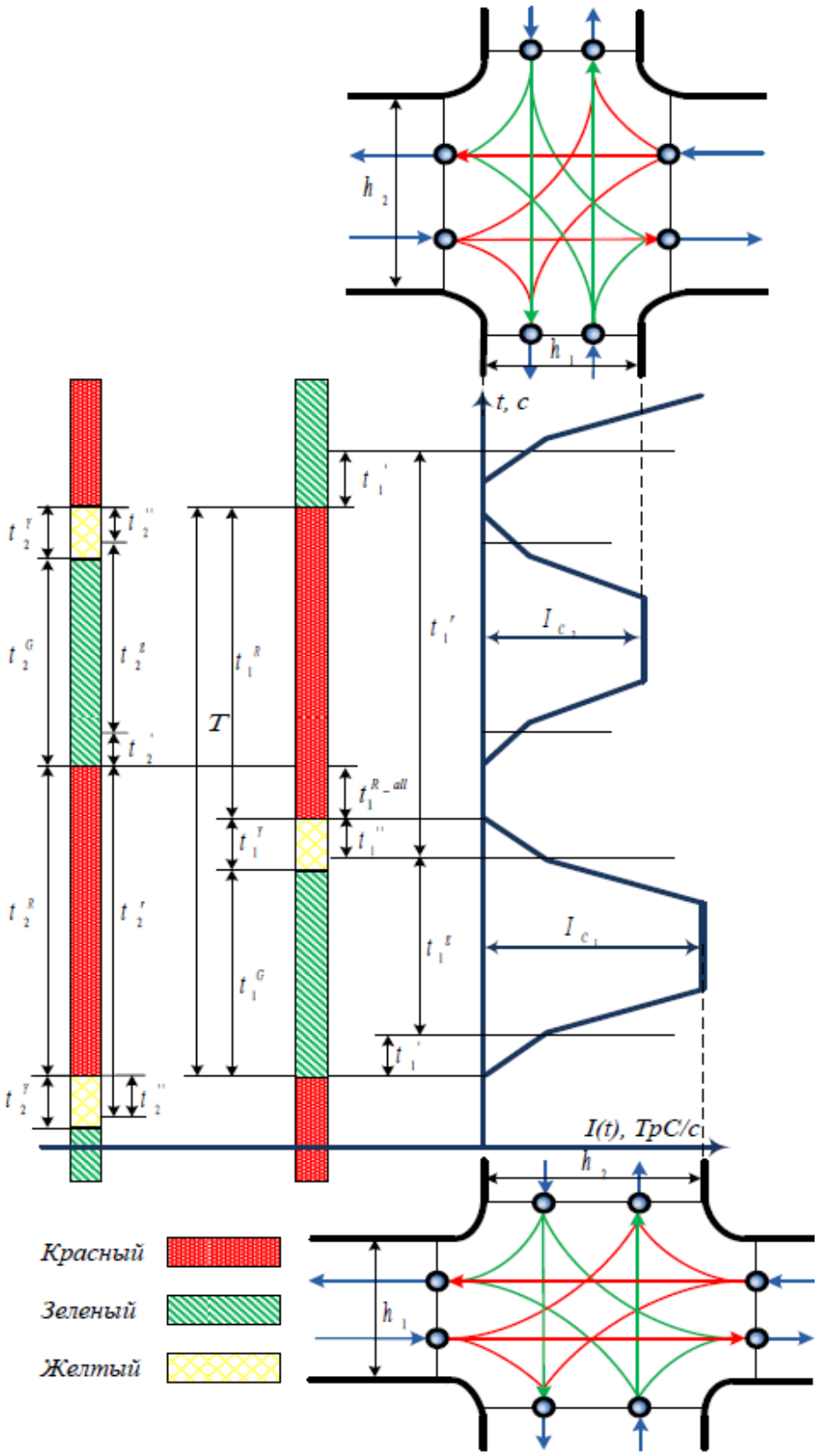


Рисунок 4 – Сигнальная программа светофорного регулирования

Figure 4 – Traffic light control signal program

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

км/ч; l_a – наиболее вероятная длина автотранспорта в исследуемом потоке, м; l_i – расстояние между дальней конфликтной точной и стоп-линией, м ; a_m – усредненное замедление автотранспорта при включившем красном (по умолчанию в расчета равно 3–4 м/с^2).

Далее выполняется расчет длительности оптимального цикла регулирования, представляющий промежуток времени, через который программа регулирования повторяется. Не рекомендуют продолжительность цикла регулирования более 120 с, так как водители могут принять светофор за не- работающий и нарушить правила дорожного движения. Длительность цикла регулирования рассчитывается по формуле

$$T = \frac{1.5 \times T_n + 5}{1 - Y}, \quad (10)$$

где T_n – сумма всех промежуточных тактов t_{ni}, с; Y – сумма максимальных значений фазовых коэффициентов всех фаз y_{ij}.

Методы управления светофорным регулированием можно разделить на три категории:

1. Управление постоянной программой [12].

2. Адаптивное регулирование с частичной зависимостью от транспортного потока[2] [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

3. Адаптивное регулирование с полной зависимостью от транспортного потока.

При управлении постоянной программой элементы сигнальной программы (продолжительность цикла, количество и последовательность фаз, длительность зеленого сигнала) остаются неизменными.

Адаптивное регулирование с частичной зависимостью от транспортного потока обозначается как «Корректировка сигнальной программы». При этом в рамках программы управления (постоянная продолжительность цикла) отдельные элементы программы (количество фаз, последовательность фаз, длительность зеленого сигнала) изменяются в зависимости от интенсивностей транспортного потока.

Адаптивное регулирование с полной зависимостью от транспортного потока обозначается как «Расчет сигнальной программы». В этой категории управления сразу все элементы программы (количество фаз, последовательность фаз, продолжительность зеленого сигнала) изменяются в зависимости от интенсивности транспортного потока. Программы с постоянной продолжительностью цикла в данном случае не существует. Характеристикой при таком методе управления является так называемый основной режим работы, который включается в том случае, когда нет запросов от детекторов транспорта на включение зеленого сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования авторским коллективом установлено, что решение задачи светофорного регулирования существенно влияет на эффективность управления дорожным движением[3] [21, 22, 23, 24]. На основании анализа методов светофорного регулирования в работе построена обобщенная имитационная модель управления фазами регулирования, основанная на использовании механизма управляемых сетей в зависимости от интенсивности транспортных потоков, и сформирована методика выбора режимов работы светофора для различных дорожных ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Novikov A., Novikov I., Katunin A., Shevtsova A. Adaptation capacity of the traffi lights control system (TSCS) as to changing parameters of traffi flows within intellectual transport systems (ITS) // Transportation Research Procedia 2017. pp. 455–462.

2. Vlasov V.M., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Definition of perspective scheme of organization of traffi using methods of forecasting and modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Cep. “International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment” 2018.

3. Жигадло А.П., Дорохин С.В., Лихачев Д.В. Новый подход к вводу дополнительной левоповоротной секции светофорного регулирования // Вестник Сибирского государственного автомобиль-

[2] Жанказиев С.В. Интеллектуальные транспортные системы : учебное пособие, М. : МАДИ, 2016. 120 с.

[3] Шевцова А.Г., Новиков И.А., Боровской А.Е. Современный подход к управлению светофорным объектом // В сборнике: Информационные технологии и инновации на транспорте материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.Н. Новикова. 2016. С. 366-370.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

но-дорожного университета. 2019. Т. 16. № 4 (68). С. 432–445.

4. Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Шубенкова К.А., Мелькова В.А. Обеспечение надежного и безопасного функционирования транспортной системы города путем интеллектуализации процессов управления // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 3(34). С. 63–72.

5. Kumar C., N. Singhl, G. Raval, Saturation Flow Analysis. International Journal for Scientific Research & Development Vol. 2, Issue 03, (2014), pp. 1032–1037.

6. Kim, J., W. Hani, J. Dong, Likelihood and Duration of Flow Breakdown Modeling the Effect of Weather Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2188, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., (2010), pp. 19–28.

7. Лихачев Д.В., Дорохин С.В. Исследование процесса ввода специализированной левоповоротной фазы регулирования // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 2 (61). С. 40–47.

8. 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.

9. 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.

10. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Методы определения потока насыщения автотрассы // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 3 (47). С. 44–51.

11. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Максимальная пропускная способность полосы при поворотном маневре // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова . 2013. № 2. С. 188–191.

12. Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Шубенкова К.А., Булатова В.А. Инновации в транспортном комплексе – путь к устойчивому развитию региона // Дорожная держава. 2013. № 50. С. 76–77.

13. Shevtsova A., Novikov I., Borovskoy A. Research of influence of time of reaction of the driver on the calculation of the capacity of the highway // Transport Problems. 2015. Т. 10. № 3. pp. 53–59.

14. Novikov A., Katunin A., Novikov I., Shevtsova A. Research of influence of dynamic characteristics for options controlled intersection // Procedia Engineering (см. в книгах). 2017. Т. 187. pp. 664–671.

15. Dorokhin S.V., Zelikov V.A., Strukov Y.V., Likhachev D.V., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Investigation of methods for calculating duration of light signal regulation cycle // Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах). 2018. Т. 1015.

16. Жанказиев С.В., Власов В.М. Научные подходы к формированию государственной стратегии развития интеллектуальных транспортных систем // Автотранспортное предприятие. 2010. № 7. С. 2–10.

17. Жанказиев С.В., Иванов А.М., Власов В.М. Научные подходы к формированию концепции построения ИТС в России // Автотранспортное предприятие. 2010. № 4. С. 2–8.

18. Жанказиев С.В., Халилев Р.Ф. Принципы формирования архитектуры локального проекта интеллектуальной транспортной системы // В мире научных открытий. 2012. № 12 (36). С. 105–111.

19. Жанказиев С.В. Обоснование определения зоны оптимальной установки для интеллектуальной транспортной системы // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2010. № 2 (21). С. 100–106.

20. Медведев В.Е., Соломатин А.В., Варламов О.О., Жанказиев С.В., Ивахненко А.М. Решение задачи регулирования дорожного движения на основе автоматизированной системы управления // В мире научных открытий. 2012. № 2-6 (26). С. 124–129.

21. 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.

22. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Методика выбора рационального режима работы светофорного объекта на автомобильном транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2012. № 6. С. 50–53.

23. Бурлуцкая А.Г., Новиков И.А., Фоменко Ю.В., Шевцова А.Г. Метод адаптации микромодели участка дорожной сети с использованием директивного управления // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 4 (59). С. 80-88.

24. Агуреев И.Е., Кретов А.Ю., Мацур И.Ю. Исследование алгоритмов светофорного регулирования перекрестка при различных параметрах транспортного потока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 54-61.

REFERENCES

1. Novikov A., Novikov I., Katunin A., Shevtsova A. Adaptation capacity of the traffi lights control system (TSCS) as to changing parameters of traffi flows within intellectual transport systems (ITS). *Transportation Research Procedia.* 2017: 455–462.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

2. Vlasov V.M., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Definition of perspective scheme of organization of traffi using methods of forecasting and modeling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11*. Cep. *"International Conference on Mechanical Engineering*, Automation and Control Systems 2017 - Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment" 2018.

3. Zhigadlo A.P., Dorohin S.V., Lihachev D.V. Novyj podhod k vvodu dopolnitel'noj levopovorotnoj sek-cii svetofornogo regulirovanija [New approach to introduction of additional left-turning section of traffi light control]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; T. 16. № 4 (68): 432–445 (in Russian).

4. Makarova I.V., Habibullin R.G., Shubenkova K.A., Mel'kova V.A. Obespechenie nadezhnogo i bezopasnogo funkcionirovanija transportnoj sistemy goroda putem intellektualizacii processov upravlenija [Ensuring reliable and safe operation of the city's transport system through the intelligent management processes]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2011; 3(34): 63–72 (in Russian).

5. Kumar C., N. Singhl, G. Raval, Saturation Flow Analysis. International Journal for Scientific Research & Development Vol. 2, Issue 03, (2014): pp. 1032–1037.

6. Kim, J., W. Hani, J. Dong, Likelihood and Duration of Flow Breakdown Modeling the Effect of Weather Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2188, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., (2010): 19–28.

7. Lihachev D.V., Dorohin S.V. Issledovanie processa vvoda specializirovannoj levopovorotnoj fazy regulirovanija [Study of the process of the specialized left-turn control phase]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2018; 2 (61): 40–47(in Russian).

8. Dorohin S.V., Lihachev D.V. Analiz podhodov k vvodu specializirovannoj levopovorotnoj polosy pri ispol'zovanii svetofornogo regulirovanija [Analysis of approaches to the introduction of a specialized left-turning band using traffi light regulation]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2019; 3 (66): 43–50 (in Russian).

9. Novikov I.A., Shevcova A.G. Vlijanie izmenenija zaderzhek transportnyh sredstv na kolichestvo rezhimov raboty svetofornogo ob'ekta [Impact of vehicle delays change on the number of modes of traffi light object operation]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2011; 4 (35): 62–68 (in Russian).

10. Borovskoj A.E., Shevcova A.G. Metody opredelenija potoka nasyshhenija avtotrassy [Methods of determining the flow of the highway saturation]. *Mir transporta*. 2013; 11. № 3 (47): 44–51 (in Russian).

11. Borovskoj A.E., Shevcova A.G. Maksimal'naja propusknaja sposobnost' polosy pri povorotnom manevre [Maximum capacity of the strip at the turning manoeuvre]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova* . 2013; 2: 188–191 (in Russian).

12. Makarova I.V., Habibullin R.G., Shubenkova K.A., Bulatova V.A. Innovacii v transportnom komplekse – put' k ustojchivomu razvitiju regiona [Innovations in the transport complex - the way to sustainable development of the region]. *Dorozhnaja derzhava*. 2013; 50: 76–77 (in Russian).

13. Shevtsova A., Novikov I., Borovskoy A. Research of influe ce of time of reaction of the driver on the calculation of the capacity of the highway. *Transport Problems*. 2015; 10. № 3: 53–59.

14. Novikov A., Katunin A., Novikov I., Shevtsova A. Research of influence of dynamic characteristics for options controlled intersection. *Procedia Engineering*. 2017; 187: 664–671.

15. Dorokhin S.V., Zelikov V.A., Strukov Y.V., Likhachev D.V., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Investigation of methods for calculating duration of light signal regulation cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1015.

16. Zhankaziev S.V., Vlasov V.M. Nauchny`e podkhody` k formirovaniyu gosudarstvennoj strategii razvitiya intellektual`ny`kh transportny`kh sistem [Scientific approaches to the formation of the state strategy for the development of intelligent transport systems]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2010; 7: 2–10.

17. Zhankaziev S.V., Ivanov A.M., Vlasov V.M. Nauchny`e podkhody` k formirovaniyu konczepczii postroeniya ITS v Rossii [Scientific approaches to formation of ITS construction concept in Russia]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2010; 4; 2–8.

18. Zhankaziev S.V., Khalilev R.F. Princzipy` formirovaniya arkhitektury` lokal`nogo proekta intellektu-al`noj transportnoj sistemy` [Principles of Formation of Architecture of Local Project of Intelligent Transport System]. *V mire nauchny`kh otkry`tij.* 2012; 12 (36):105–111.

19. Zhankaziev S.V. Obosnovanie opredeleniya zony` optimal`noj ustanovki dlya intellektual`noj trans-portnoj sistemy`[Justification of the definition of the zone of optimal installation for the intelligent trans-port system]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil`-no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2010; 2 (21): 100–106.

20. Medvedev V.E., Solomatin A.V., Varlamov O.O., Zhankaziev S.V., Ivakhnenko A.M. Reshenie zadachi regu-lirovaniya dorozhnogo dvizheniya na osnove avtomatizirovannoj sistemy` upravleniya [Solving the problem of traffi regulation on the basis of an automated management system]. *V mire nauchny`kh otkry`tij*. 2012; 2-6 (26): 124–129.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

21. Novikov I.A., Shevczova A.G. Vliyanie izmeneniya zaderzhek transportny`kh sredstv na kolichestvo rezhimov raboty` svetofornogo ob`ekta [Impact of vehicle delays change on the number of modes of traffic light object operation]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2011; 4 (35): 62–68.

22. Borovskoj A.E., Shevczova A.G. Metodika vy`bora raczional`nogo rezhima raboty` svetofornogo ob`ekta na avtomobil`nom transporte [Methodology of selection of rational mode of operation of traffi light object on road transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchny`j informaczionny`j sbornik*. 2012; 6: 50–53.

23. Burluczkaya A.G., Novikov I.A., Fomenko Yu.V., Shevczova A.G. Metod adaptaczii mikromodeli uchastka do-rozhnoj seti s ispol`zovaniem direktivnogo upravleniya [Method of adaptation of the micromodel of the section to the native network using the policy control]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2017; 4 (59):80–88.

24. Agureev I.E., Kretov A.Yu., Maczur I.Yu. Issledovanie algoritmov svetofornogo regulirovaniya pere-krestka pri razlichny`kh parametrakh transportnogo potoka [Study of algorithms of traffi light regulation of pen-cross at different parameters of transport flow]. *Izvestiya Tul`skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2013; 7–2: 54–61.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Новиков А.Н. Постановка цели и задачи исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом.

Еремин С.В. Анализ существующих методов организации светофорного регулирвоания, описание методологии расчета базовых показателей.

Шевцова А.Г. Выполнение аналитических исследований, разработка имитационной модели управления фазами регулирования.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander N. Novikov – setting the goal and objectives of the research; analysis and familiarization with foreign and domestic experience.

Sergey V. Eremin – analysis of existing methods of traffic light regulation organization; description of the meta-degree of the basic indicators' calculations.

Anastasia G. Shevtsova – carrying out analytical research; development of simulation model of the phases' control.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Александр Николаевич (г. Орел, Россия) – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева ORCID ID 0000-0001-5496-4997 (302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: novikovan@ostu.ru).

Еремин Сергей Васильевич (г. Орел, Россия) – докторант кафедры «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева ORCID ID 0000-0001-8220-248X (302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95, e-mail: srmostu@mail.ru).

Шевцова Анастасия Геннадьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова ORCID 0000-0001-8973-9271 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru).*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander N. Novikov – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of the Service and Repair of Machines, Orel State University named after I.S. Turgenev, ORCID ID 0000-0001-5496-4997 (302026, Orel, 95, Komsomolskaya St., e-mail: novikovan@ostu.ru).

Sergey V. Eremin – Doctoral candidate of the Department of the Service and Repair of Machines, Orel State University named after I.S. Turgenev, ORCID ID 0000-0001-8220-248X (302026, Orel, 95, Komsomolskaya St., e-mail: srmostu@mail.ru).

Anastasia G. Shevtsova – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of the Operation and Organization of Traffic, Belgorod State Technological Universitynamed after V.G. Shukhov, ORCID 0000-0001-8973-9271 (308012, Belgorod, 46, Kostyukova St., e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru).*

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 656.1
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-692-705

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОМСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

К.Э. Сафронов, Э.А. Сафронов
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В рамках приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги» в регионах ведется разработка и реализация программ комплексного развития транспортной инфраструктуры – автомобильных и муниципальных дорог, приведение дорожной сети городских агломераций в нормативное транспортно-эксплуатационное состояние, устранение перегрузки дорожной сети городских агломераций, оптимизация транспортных потоков, повышение эффективности системы управления дорожным движением. В статье дана оценка эффективности вариантов развития транспортной инфраструктуры Омской области до 2041 г.*

Материалы и методы. *В научных исследованиях использовались методы анализа действующих нормативных, правовых, программных документов, проведение и анализ результатов обследований интенсивности дорожного движения в ключевых узлах с разбивкой по видам транспорта, проведение и анализ результатов обследований пешеходного движения в ключевых точках, анализ существующих условий дорожного движения, полученных по результатам разработки транспортной макромодели Омской агломерации в программном комплексе PTV Vision VISUM, анализ причин и условий возникновения дорожно-транспортных происшествий, заторов, анализ статистических данных по грузообороту и пассажирообороту на территории Омской агломерации.*

Практическая значимость исследования. *В статье представлены результаты научных исследований, проведенных на примере Омской агломерации. Они легли в основу разработки программ комплексного развития транспортной инфраструктуры г. Омска и восьми районов Омской агломерации. Приведен обзор литературы по данной тематике, учтены достижения зарубежной науки.*

Обсуждение и заключение. *Необходимо постоянно совершенствовать методы получения данных, используемых при формировании транспортной модели, для улучшения показателей функционирования транспортной инфраструктуры современных городов. Материал будет полезен при реализации приоритетного проекта.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *программа комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексная схема организации дорожного движения, транспортные и пассажирские потоки, обследования, безопасность дорожного движения.*

Поступила 29.03.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Сафронов К.Э., Сафронов Э.А. Оценка эффективности вариантов комплексного развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 692–705. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-692-705

© Сафронов К.Э., Сафронов Э.А.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-692-705

TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE OMSK AGGLOMERATION: EVALUATION OF THE COMPLEX DEVELOPMENT OPTIONS

Kirill E. Safronov, Eduard A. Safronov
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *On the basis of the priority project "Safe and High-quality Roads", the researches develop and implement the programs of the transport infrastructure integrated development – highways and municipal roads, bringing the urban agglomeration network into a standard transport and operational state, eliminating the congestion of the urban agglomerations' network, optimizing traffic flows, increasing efficiency traffic management systems. The paper assesses the options' effectiveness of the transport infrastructure development in the Omsk region until 2041.*

Materials and methods. *The authors used analysis methods of existing regulatory, legal, program documents; of carrying out and analyzing the results of traffic intensity surveys at key nodes by means of transport; of conducting and analyzing the results of pedestrian traffic surveys at key points; analyzing the existing traffic conditions obtained from the results of the development of the transport macro model of the Omsk agglomeration in the PTV Vision VISUM software; of analyzing causes and conditions of accidents; of analyzing statistical data on freight turnover and passenger traffic in the Omsk agglomeration.*

Results. *The paper presented the research results on the Omsk agglomeration's example. The results formed the programs' basis for the integrated development of the transport infrastructure of Omsk and eight districts of the Omsk agglomeration. Moreover, the authors presented the literature review and took into account the achievements of foreign science.*

Discussion and conclusions. *The authors emphasize that it is necessary to improve the methods of obtaining data used in the formation of the transport model and to improve the performance of the transport i modern cities' infrastructure.*

KEYWORDS: *integrated development program of transport infrastructure, integrated traffic management scheme, transport and passenger flows, sociological survey, road safety.*

Submitted 29.03.2019, revised 17.12.2019.
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: Safronov Kirill E., Safronov Eduard A. Transport infrastructure of the Omsk agglomeration: evaluation of the complex development options. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 692–705 (n Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-692-705

© Safronov K.E., Safronov E.A.

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

ВВЕДЕНИЕ

В целях исполнения решений Президента Российской Федерации в регионах осуществляется реализация приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги»[1]. В рамках этого проекта запланирована разработка и реализация программ развития транспортной инфраструктуры (ПКРТИ). ПКРТИ предусматривает консолидацию ресурсов за счет всех возможных источников (федеральные целевые программы, региональные и муниципальные программы и т.д.) на решение поставленных приоритетных задач. ПКРТИ обеспечивает решение вопросов, связанных с обеспечением безопасности дорожного движения (БДД), приведением дорожной сети городских агломераций в нормативное транспортно-эксплуатационное состояние; устранение перегрузки дорожной сети городских агломераций, в том числе за счет переключения перевозок пассажиров на общественный транспорт, оптимизации транспортных потоков, повышения эффективности системы управления дорожным движением; переход на современные модели развития транспортной инфраструктуры с использованием комплексных схем организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом, синхронизации развития всех видов транспорта и транспортной инфраструктуры, повышение уровня удовлетворенности граждан состоянием дорожной сети городской агломерации.

С 2019 г. в проект «Безопасные и качественные дороги», который реализуется с 2017 г., будут включаться капиталоемкие мероприятия: строительство, реконструкция дорог, развязок, расширение существующих дорог, для этого необходимо разработать ПКРТИ на основании комплексных схем организации дорожного движения (КСОДД). ПКРТИ Омской области была разработана ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ») в 2018 г. на основе НИР «Разработка комплексных схем организации дорожного движения для дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, относящихся к собственности Омской области и системы организации транспортного обслуживания населения на территории Омской области в части границ Омской агломерации на период 2019 – 2041 гг.».

Сбор и анализ исходных данных для разработки расчетного инструментария мультимодальной транспортной модели был выполнен специалистами СибАДИ. В задачи исследования входили:

- анализ данных о параметрах дорожной сети и существующих схем организации дорожного движения, выявление проблем, влияющих на развитие транспортной системы;
- прикладные и поисковые научные исследования в области изучения подвижности населения Омской области, выявления особенностей транспортного поведения населения Омской области, выявления закономерностей распределения транспортных потоков по автомобильным дорогам регионального или межмуниципального значения, относящихся к собственности Омской области;
- анализ существующей системы пассажирского и грузового транспорта;
- анализ существующей сети транспортных корреспонденций в границах муниципальных образований, расположенных на территории Омской области.

ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Транспортные проблемы характерны для многих современных стран и городов и специалисты ищут оптимальные пути их решения. Высокий уровень автомобилизации определяет развитие экономического потенциала общества и обеспечивает максимальное удовлетворение транспортных потребностей населения. С другой стороны, это ведет к ухудшению состояния окружающей среды [1]. Из-за этого снижаются скорости транспортных потоков, растет загрязнение окружающей среды, связанное с движением транспорта, с соответствующим неблагоприятным социальным и финансовым воздействием на различные рынки по всему миру [2]. Специалистами [3] установлено, что муниципальные власти при создании модели управления системой городского пассажирского транспорта (ГПТ) должны в полной мере изучать потребности городского населения, пассажиропотоки и на этой основе определять маршруты и графики движения.

Запасы ископаемого топлива истощаются, их цена растет и подвержена непредсказуемым колебаниям. На местном уровне выбросы парниковых газов и мелкие частицы

[1] Паспорт приоритетного проекта «Безопасные и качественные дороги». Утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам (протокол от 21 ноября 2016 г. № 10).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

загрязняющих веществ оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье людей и их среду обитания. С этой целью многие европейские города пытаются принять стратегии планирования, направленные на устойчивое использование общественного транспорта. Из-за общепризнанных нелинейных взаимозависимостей системы городского транспорта [4], эффекты этой политики трудно предвидеть. Иногда конечный эффект может противоречить интуитивным ожиданиям, вызывая обратные последствия. Акцизы могут быть определены в целом как косвенные налоги избирательного характера. Учитывая, что потребление топлива напрямую зависит от объема использования транспорта, некоторые государства (например, Германия, Швейцария) ввели определенную долю сбора акцизов в качестве источника финансовой поддержки общественного пассажирского транспорта [5]. Таким образом, более высокая цена на топливо предполагает более низкие тарифы в общественном пассажирском транспорте, и это также предполагает сокращение пробок и выбросов парниковых газов. Помимо некоторых государств-членов ЕС этот метод финансирования общественного транспорта также используется в США [6].

Экологические проблемы транспорта в последние годы решаются путем замены автобусов с традиционными двигателями на электрические. Процесс внедрения электрического автобуса является сложным с точки зрения технических, транспортных, экономических и экологических проблем. Специалистами [7] разработан алгоритм поддержки принятия решений операторами и организаторами общественного транспорта, обеспечивающий оптимальный процесс внедрения электрических автобусов на ГПТ.

Используя имитационное моделирование, авторы [8] разработали математическую модель функционирования транспортной сети и информационной системы, реализованной в среде SIMUL8 на пример городской сети общественного транспорта в г. Тамбове, включающей более 60 автобусных маршрутов, которые позволяют автоматизировать процесс имитационного моделирования и обработки результатов имитационного моделирования.

В докладе о ключевых концепциях транспорта будущего проведен обзор литературы с целью определения ключевых концепций транспорта, применимых к пассажирам и к сектору грузовых перевозок на период до 2035 г.[2] Типичным примером, широко обсуждаемым в литературе, является будущее существование концепции общей мобильности – MaaS (мобильность как услуга), направленной на переход от владения персональными транспортными средствами к услугам, предлагающим мобильность в качестве продукта, например, совместное использование поездок, совместное использование автомобилей или автономных транспортных средств.

В статье К. Ли и др. рассматривается комплексная транспортная развязка Шэньчжэнь-Футянь, в которой используется непрерывная многократная динамическая информация о движении в реальном времени для мониторинга и анализа пространственного и временного распределения пассажиропотока при различных видах транспорта и сервисная емкость соединения многомерных пространственно-временных перспектив, таких как разные периоды и специальные периоды [9]. С. Балди и др. провели исследование, чтобы проанализировать эффективность адаптивной стратегии реагирования на трафик, которая управляет параметрами светофора (время светофорного цикла, фаз и тактов) в городской сети, чтобы уменьшить заторы на дорогах [10].

Развитие транспортных систем является одной из глобальных целей устойчивого развития и приоритетной областью работы Общеевропейской программы по транспорту, окружающей среде и охране здоровья, которая ориентирована на безопасный, эффективный, доступный, инклюзивный, экологичный и мобильный транспорт[3]. Приоритетной является задача интегрировать цели в области транспорта, здравоохранения и окружающей среды в политику городского и пространственного планирования для уменьшения воздействия транспорта на здоровье, окружающую среду и землепользование, увеличения энергоэффективности и поддержку зеленой и здоровой мобильности и транспорта, а также

[2] D2.2 Доклад о ключевых концепциях транспорта будущего (Версия 1, 30/04/2018).

[3] The Global Goals for Sustainable Development. Available at: http://www.globalgoals.org/global-goals/sustainable-cities-and-communities.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

устойчивых средств к существованию[4]. Планирование городских и пригородных центров в соответствии с принципами смешанного использования и разумного роста должно стать частью устойчивого транспортного будущего. Развитие городов в соответствии с этими принципами будет способствовать снижению зависимости от личных транспортных средств и поддержке в более широком использовании систем общественного транспорта и немоторизованного транспорта для коротких расстояний и ежедневных поездок на работу [11].

Например, особенности развития транспортной системы США были связаны с реализацией «Нового курса» Рузвельта по развитию инфраструктуры. Поэтому города США, несмотря на свою прямоугольную планировку и широкие улицы, первыми столкнулись с проблемами, связанными с быстрым ростом автомобилизации. Во многих жилых и деловых районах на окраинах США нет доступа к линиям общественного транспорта. Только в последние годы в некоторых городах Северной Америки начали разрабатываться ориентированные на человека концепции, обеспечивающие доступ людей к услугам личного и общественного транспорта, а также велосипеда [12].

Доля поездок на общественном транспорте на душу населения в сутки в США составляет 2%, Австрия (17%), Швеция (14%), Германия (12%), Великобритания (10%), Норвегия (10%), Франция (8%), Финляндия (8%) и Швейцария (24%) [13]. Несколько факторов объясняют более низкий пассажиропоток общественного транспорта в Соединенных Штатах, чем в Европе и Канаде. Во-первых, США имеют более низкую плотность населения и более низкую плотность пригородной инфраструктуры, часто со строгим разделением землепользования. Низкую плотность населения трудно эффективно обслуживать на общественном транспорте [14, 15]. Во-вторых, легкая доступность автомобилей и низкая стоимость владения затрудняют конкуренцию общественному транспорту [16]. В-третьих, удобное транспортное сообщение с бесплатной парковкой делает вождение очень привлекательным и дешевым [17]. Наконец, в нескольких исследованиях было выявлено низкое качество общественного транспорта в Соединенных Штатах по сравнению с другими странами.

Реформирование общественного транспорта связано с внедрением рыночных механизмов в управление [18]. Внедрение льгот и ограничений для пассажиров и транспортных операторов позволит эффективно развивать систему общественного транспорта [19].

Поэтому необходимо установить наиболее эффективный способ регулирования системы пассажирских перевозок, в том числе определение политики муниципальных органов власти с учетом интересов транспортных операторов и пассажиров. Общественный транспорт – это социально-экономическая система, основным элементом которой является пассажир [20].

Городское пространство необходимо переосмыслить для оптимизации транспортных потоков, а также для увеличения использования пешеходного движения и велосипедов [21]. Как сказано в резолюции, принятой в 2018 General Assembly, к 2030 году необходимо обеспечить всех жителей безопасными, недорогими, доступными и экологичными транспортными системами, на основе повышения безопасности дорожного движения, в частности, расширить использование общественного транспорта для маломобильных пассажиров.

Компьютерное моделирование было выбрано многими исследователями в качестве инструмента для решения проблем маршрутизации и управления городским движением, поскольку оно осуществляет итеративную разработку модели, пошаговую детализацию моделируемых подсистем, что позволяет постепенно увеличивать точность оценки по мере появления новых вопросов и новой информации.

Поиск оптимального маршрута относится к NP-трудных задач. Методы решения таких задач разделяют на точные, эвристические и метаэвристические [22]. Точные методы основаны на полном переборе всех возможных решений, что, в свою очередь, делает их неэффективными. Эвристические методы производят относительно ограниченный поиск решений и обычно находят довольно хорошее решение за приемлемое время. Но данные методы также обладают недостатком, а именно, они являются приблизительными [23]. Метаэвристические – самые эффективные, но в данных методах есть параметр, который напрямую влияет на результат, исходя из вход-

[4] Paris Declaration. City in motion: People first. Geneva: United Nations Publications. 2015. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/thepep/Publications/2015/Paris_Declaration_in_English_Final.pdf

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ных данных [24], и на практике приходится каждый раз отлаживать этот параметр заново.

Колебер Ю.А. сформулировала следующие особенности, характерные для процесса оптимизации маршрутной сети ГПТ [25]: она невозможна без предварительного получения матрицы пассажирских корреспонденций; процессу оптимизации должен предшествовать процесс сбора большого количества исходных данных; задачу оптимизации усложняет расхождение интересов перевозчиков и пассажиров в системе ГПТ; при современном развитии методов оптимизации невозможно обойтись без применения соответствующих сложных программно-вычислительных комплексов, но в то же время необходимы заключительные оценки экспертов.

При разработке транспортной макромодели Омской агломерации был использован программный комплекс PTV Vision VISUM, который потребовал сбора большого количества исходных данных. Приведем результаты работы разработки ПКРТИ на примере г. Омска.

ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОМСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

По данным официальных источников, на территории Омской области в 2017 г. было зарегистрировано 554 341 легковых автомобилей и проживало 1 972 682 чел, уровень автомобилизации составил 281 авт./тыс. жит., что соответствует среднероссийскому[5]. Наличие автобусов в Омской области в 2017 г. составило 14 146 ед. (106,7% по сравнению с 2016 г.). Система ГПТ г. Омска включает в себя городской автомобильный транспорт (автобусы и маршрутные такси), городской электрический транспорт (трамваи, троллейбусы), железнодорожный транспорт (пригородные электрички). Перевозки автомобильным транспортом общего пользования по г. Омску осуществляются по 154 постоянным муниципальным маршрутам регулярных перевозок общей протяженностью 2972,4 км и дополнительно по 13 сезонным муниципальным маршрутам общей протяженностью 179,1 км, движение по которым организовано в летние месяцы. Перевозки городским электрическим транспортом осуществляются по 8 троллейбусным маршрутам общей протяженностью 113,5 км и 6 трамвайным маршрутам общей протяженностью 62,8 км. Расходы на транспортное обслуживание населения, выделяемые из бюджета города, по автобусным, троллейбусным и трамвайным перевозкам в 2017 г. составили 209,748 млн руб.

Анализ существующих условий для развития и размещения транспортной инфраструктуры муниципальных районов (МР) приведены на основе количественной оценки основных показателей транспортного потока в таблице 1.

Таблица 1
Показатели работы транспортной системы Омской агломерации

Table 1
Performance of the transport system of the Omsk agglomeration

Город и МР Омской агломерации	Показатели работы транспортной системы				
	Количество поездок на ОТ, пассажиров /сут	Количество поездок на ИТ, пассажиров/сут	Средняя скорость ОТ, км/ч	Средняя скорость ИТ, км/ч	Среднее время поездки, мин
г. Омск	1161100	554370	29	39,2	27,0
Омский МР	25 600	78 300	28	36,5	29,1
Горьковский МР	2300	8900	55,6	62,5	35,5
Шербакульский МР	1300	9100	50,2	61,4	24,4
Азовский немецкий национальный МР	3400	14400	50,2	61,4	24,4
Кормиловский МР	1200	10500	43,2	55,3	37,9
Любинский МР	3600	15700	44,90	62,45	36,5
Марьяновский МР	3400	14400	50,94	61,4	25,41
Таврический МР	1600	15400	50,7	62,5	48
Итого	1203500	721070	44,7	55,9	32,0

[5] Паспорта муниципальных образований Омской области // Данные службы государственной статистики [электронный ресурс]. – URL: http://www.gks.ru/scripts/db_inet2/passport/munr.aspx?base=munst52

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Результаты анализа говорят о необходимости совершенствования ключевых элементов транспортной инфраструктуры Омской городской агломерации как в части реконструкции УДС, так и улучшения обслуживания пассажиров, формирование новых и реорганизацию существующих транспортно-пересадочных узлов (ТПУ). Существующие элементы не обеспечивают как текущую потребность в транспортном обслуживании, так и потребность с учетом вариантов развития.

На территории Омской городской агломерации на пассажирском транспорте общего пользования всех видов ежегодно наблюдается снижение пассажиропотока. Одной из существенных причин является непрерывный рост автомобилизации: транспортный спрос населения на поездки постепенно перераспределяется в пользу использования личного транспорта. В ряде других факторов, оказывающих влияние на снижение пассажиропотока, является низкое качество транспортного обслуживания населения общественным транспортом, отсутствие постоянных транспортных связей отдаленных территорий с ядром агломерации. Во всех городах районных центров организовано транспортное обслуживание жителей, но наиболее показательной является система ГПТ г. Омска. В таблице 2 представлены данные о динамике объема пассажирских перевозок на общественном транспорте г. Омска.

В 2017 г. транспортные услуги на территории г. Омска осуществляли 3 муниципальных пассажирских автотранспортных предприятия, муниципальное предприятие «Электрический транспорт», Открытое акционерное общество «Пассажирское автотранспортное предприятие № 2», а также 68 перевозчиков немуниципальной формы собственности, имеющих лицензию на перевозку пассажиров автомобильным транспортом.

В муниципальных пассажирских предприятиях г. Омска сложилась крайне сложная финансовая ситуация, не позволяющая качественно и в необходимых объемах обеспечивать транспортное обслуживание населения.

С 2019 г. в городе действует и развивается автоматизированная система оплаты проезда, введенная в целях улучшения транспортного обслуживания населения, уменьшения оборота наличных денег, автоматизированного учета движения денежных средств и ведения полного учета количества перевезенных пассажиров в каждом транспортном средстве по категориям (льготный, с проездными билетами, за наличную оплату).

На данный момент качество обслуживания населения общественным транспортом оценивается жителями Омской агломерации весьма низко. По данным социологического опроса, средневзвешенная оценка населением качества общественного транспорта составляет 2,91 балла из 5 возможных. Отмечается низкий уровень санитарного состояния остановочных пунктов и технического состояния подвижного состава общественного транспорта, а также недостаточная информативность. Согласно данным проведенного опроса, наиболее важным критерием оценки качества является время ожидания пассажиром ТС, следующего по нужному маршруту. Средневзвешенная оценка данного показателя составляет 3,1 балла по пятибалльной шкале.

Таблица 2
Динамика перевозки пассажиров по видам ГПТ г. Омска, тыс. чел

Table 2
Dynamics of passenger transportation by types of public passenger transport in Omsk, thousand people

Наименование	2015	2016	2017	2017/2015, %
Автобусы (включая маршрутные такси)	289 818	251 989	219 684	76%
Трамваи	11 993	10 422	9828	82%
Троллейбусы	31 243	23 651	23 745	76%
Всего	333 054	286 062	253 257	76%

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Такой показатель, как соблюдение норм вместимости, согласно опросу, также является весьма важным, однако его среднее значение составляет 2,69 балла, что означает несоответствие пассажировместимости транспорта количеству пассажиров.

Состояние ряда объектов транспортной инфраструктуры г. Омска можно назвать ненадлежащим: 30,8% автомобильных дорог общего пользования местного значения, находящихся в собственности города, не имеют твёрдого покрытия. Более 52% улиц, проездов, набережных не оборудованы системами уличного освещения.

Аналогичный анализ проведен в каждом МР Омской агломерации.

ПРОГНОЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОМСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

В соответствии с планами и прогнозами социально-экономического развития Омской агломерации разработаны сценарии развития транспортной инфраструктуры для каждого МР. На примере г. Омска он выглядит следующим образом.

Демографическая ситуация будет складываться под влиянием тенденций последних лет и характеризоваться следующим:

- продолжение сокращения среднегодовой численности населения на 1–2% в краткосрочной перспективе со стабилизацией показателя в среднесрочной перспективе;

- восстановление среднегодовой численности населения прогнозируется в долгосрочном периоде под воздействием положительных тенденций в экономике города.

В результате, среднегодовая численность населения к 2041 г. составит 1 176 тыс. чел, что соответствует уровню 2017 г.

Прогноз общего объема внутригородских перемещений разрабатывался на базе расчета среднесуточных перемещений моторизированным транспортом в будни как максимального периода спроса. При этом в качестве исходных показателей использованы:

- среднегодовая численность населения в трудоспособном возрасте с учетом доли в 15%, относящейся к не участвующим в перемещениях и перемещающимся пешком или альтернативным транспортом;

- среднее количество перемещений на 1 участника перемещений – 2,4 поездки в сутки в базовый период с ростом до 2,61 поездок в прогнозном периоде: значения принимаются на основании средних значений показателя для городов с аналогичным уровнем развития и автомобилизации.

Таким образом, расчетный общий объем внутригородских перемещений на моторизированном транспорте вырастет в прогнозном периоде более чем на 30%.

Предполагается осуществление пассажироперевозок автобусами, маршрутными такси и легковым транспортом, максимальное развитие электрических видов транспорта – троллейбусных и трамвайных линий, при этом трамвай – только на новом качественном уровне: бесшумный, с современными вагонами, на обособленном современном полотне, с оптимальной скоростью движения, с бесшовными пересадками в ТПУ.

Для поддержки взаимодействия различных транспортных систем планируется развитие инфраструктуры ТПУ, в частности, в центральной части города на пересечении основных магистральных направлений и вблизи транспортных терминалов.

Развитие улично-дорожной сети (УДС) будет осуществляться в соответствии с положениями Генерального плана и другими документами планирования на территории города.

Уровень автомобилизации в городе превысит 300 легковых автомобилей на 1000 жителей уже в среднесрочной перспективе. К концу прогнозного периода уровень автомобилизации в г. Омске может превысить 350 легковых автомобилей на 1000 жителей. Данный прогноз не означает увеличения объема транспортного спроса на перемещения личным автомобильным транспортом и будет сбалансирован развитием ГПТ. Несмотря на постоянное увеличение парка автотранспортных средств планируется снижение уровня аварийности как в части общего числа, так и в части тяжести дорожно-транспортных происшествий.

Снижение аварийности будет обеспечиваться за счет контроля за выполнением мероприятий целевых региональных программ по обеспечению БДД, развитие систем фото- и видеофиксации нарушений правил дорожного движения, проведение профилактической работы среди населения с привлечением средств массовой информации.

Увеличение экологической нагрузки будет связано с ростом автомобилизации в условиях роста благосостояния населения и повышения спроса на транспортировку грузов ввиду повышения объемов производства и торговли.

Компенсационными по отношению к росту автомобилизации станут развитие ГПТ,

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ожидаемый результат – перераспределение транспортного спроса и улучшение условий дорожного движения, результат – сокращение времени в пути.

ВАРИАНТЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Принципиальных вариантов развития транспортной инфраструктуры три. Минимальный вариант развития транспортной инфраструктуры подразумевает минимизацию объемов капиталовложений в основном за счет сокращения объемов строительства и реконструкции объектов инфраструктуры и включает реализацию мероприятий по строительству и реконструкции УДС города на основании федеральных и региональных планов развития. Таким образом, в минимальном варианте развития предусмотрен вынос аэропорта за черту города на территорию агломерации и связанные с этим задачи по повышению пропускной способности УДС в основном за счет локальных мероприятий по реконструкции и мероприятий по организации дорожного движения.

Оптимальный вариант предназначен для реализации в условиях стабильного финансирования в значительно большем объеме, чем при реализации минимального варианта. Основная часть дополнительных капитальных вложений связана с расширением списка мероприятий по развитию городской УДС и других инфраструктурных объектов. Кроме того, оптимальный вариант включает строительство других крупных объектов транспортного комплекса:

- дополнительного мостового перехода через р. Иртыш в створе улиц Граничная и Труда с обустройством трамвайных путей;

- северного обхода города (проходит вне границ городского округа), который должен обеспечить пропуск транзитных потоков автомобильного транспорта, связать объекты северной и северо-западной промышленных зон и обеспечить кольцевую связанность городских территорий.

В оптимальный вариант также входят мероприятия по развитию инфраструктуры системы ГПТ, включая мероприятия по созданию использования объектов метро для эксплуатации направляемого электробуса.

Максимальный вариант развития разработан с целью достижения максимальной пропускной способности транспортной инфраструктуры. В целом этот вариант является в наибольшей степени экстенсивным, т.е. требующим большего количества новых объектов и территорий для реализации. В части развития УДС предполагается полная реализация мероприятий Генерального плана города, в частности, мероприятий по созданию магистральных направлений нерегулируемого движения, включая строительство необходимых для этого транспортных развязок, развитие системы метрополитена и организацию новых ТПУ вблизи станций метро и ж.-д. станций.

Для снижения экологической нагрузки рассмотрена возможность закупки и опытной эксплуатации автобусов, использующих газомоторное топливо, электробусов. В марте 2019 г. в г. Омск на испытания прибыл первый электробус.

На среднесрочный и долгосрочный период запланированы следующие мероприятия:

- совершенствование системы мониторинга единиц подвижного состава в реальном времени;

- внедрение системы мониторинга пассажиропотоков на всех маршрутах, на основе автоматических счетчиков пассажиров;

- система оптимизации маршрутных расписаний путем автоматизации их формирования на основе данных мониторинга пассажирских потоков;

- оптимизация подвижного состава на основании данных о пассажирских потоках;

- обновление парка подвижного состава, в первую очередь закупка подвижного состава, соответствующего современным экологическим требованиям.

Максимальный вариант развития также подразумевает масштабную модернизацию оборудования и внедрение интеллектуальных транспортных систем с целью адаптивного управления транспортными потоками в режиме реального времени. Для реализации технологических решений в данном направлении требуется закупка и установка специализированного оборудования по мониторингу на основных магистральных улицах города, а также оборудование центра управления и обработки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПРОГРАММЫ

В рамках реализации мероприятий, направленных на повышение спроса на транспортные перемещения с использованием общественного транспорта, в том числе доступности услуг общественного транспорта, будут достигнуты следующие результаты:

- сформированы дополнительные маршруты и увеличено количество транспортных

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

средств на существующих маршрутах в отдаленные от центра агломерации жилые массивы;

- повысится эффективность работы общественного транспорта, уровень качества и безопасности транспортных услуг;

- увеличится количество поездок, средняя длина поездки, уменьшится время, затраченное на перемещение, а следовательно, увеличатся объемы пассажиропотоков как в городе, так и на территории агломерации.

Обновление парка автобусов предполагается выполнить в кратчайшие сроки, так как на момент исследований 90% подвижного состава автобусов находилось в ненормативном состоянии. В 2018 г. этот процесс стартовал, в г. Омске было обновлено 200 ед. подвижного состава автобусов различной вместимости экологического класса. Также на испытания прибыл электробус. До 2021 г. планируется повышение доли транспортных средств со сроком эксплуатации до 5 лет и экологическим классом евро 4, 5 до 75% от общей доли парка автобусов агломерации. До 2023 г. предполагается дальнейшее обновление парка транспортных средств автомобильного транспорта общего пользования с повышением доли транспортных средств со сроком эксплуатации до 5 лет и экологическим классом «Евро–4» и «Евро–5» до 100% от общего количества транспортных средств в парках компаний-перевозчиков. Реализация мероприятий повысит эффективность работы общественного транспорта, уровень качества и безопасности транспортных услуг, а также снизит затраты предприятий на осуществление перевозок и степень загрязнения окружающей среды от работы транспорта.

Совершенствование маршрутной сети рассматривается в краткосрочной перспективе и предполагает изменение существующих, введение новых и исключение дублирующих маршрутов общественного транспорта. Рост жилой застройки и развитие промышленных центров на территории города и пригородных поселений требуют развития маршрутной сети и изменения количества подвижного состава на линиях. Для снижения нагрузки на транспортную сеть и текущие автотранспортные парки предприятий с обеспечением растущих потребностей в пассажирском транспорте предложены мероприятия, включающие строительство автовокзалов, ТПУ, железнодорожных путей.

В краткосрочной перспективе предусмотрены мероприятия, задачами которых является дальнейшее обновление и обустройство остановочных пунктов на территории городской агломерации. Большинство остановочных пунктов, согласно данным социологического опроса населения, находятся в плохом техническом и санитарном состоянии (средневзвешенная оценка по данному критерию составила 2,63 балла из 5). Данный критерий является одним из самых важных для населения. Обустройство остановочных пунктов позволит повысить качество транспортного обслуживания населения и привлекательность использования городского пассажирского транспорта. Запланировано сооружение теплых павильонов с туалетами на конечных пунктах маршрутов ГПТ.

Одной из характеристик устойчивости пассажирского транспорта общего пользования является обеспечение удобных условий использования для всех категорий граждан, в том числе для граждан с ограниченными возможностями. Данное мероприятие в среднесрочной перспективе предусматривает оборудование тактильной плиткой остановочных павильонов на территории города и районных центров. Реализация мероприятия позволит повысить качество и безопасность перемещения людей с ограниченными возможностями по зрению.

Внедрение новых технологий для оплаты проезда и отслеживания транспорта существенно повысит спрос на передвижения на общественном транспорте. Предложено мероприятие, предусматривающее внедрение единой системы оплаты во всех муниципальных маршрутах и части межмуниципальных маршрутов на территории агломерации. Кроме того, предлагается внедрение спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС на подвижном составе для управления движением пассажирского транспорта.

В ходе реализации мероприятий краткосрочной, среднесрочной, долгосрочной перспективы ожидается значительное повышение качества транспортного обеспечения общественным транспортом территории Омской агломерации, что отразится в достижении высокого уровня доступности услуг ГПТ для подавляющего большинства жителей агломерации.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Сравнение вариантов работы системы автомобильного транспорта общего пользования на 2041 г. на примере г. Омска

Table 3
Comparison of options for the operation of the public transport system in 2041 on the example of Omsk

Показатель	Варианты			
	Базовый	Инерционный	Сбалансированный	Динамичный
Средняя скорость движения, км/ч	19,5	18,1	18,6	18,7
к инерционному сценарию	-	0,1	0,13	0,13
Средняя дальность поездки по Омской агломерации, км	19,2	17,5	16,9	17
к инерционному сценарию	-	-0,07	-0,1	-0,1
Среднее время поездки на автомобильном транспорте, мин	58,9	57,9	54,5	54,5
к инерционному сценарию	-	-0,16	-0,21	-0,21
Среднее время поездки на автомобильном транспорте общего пользования, мин	28,9	28,4	28,4	28,4
к инерционному сценарию	-	7%	7%	7%

Оценка эффективности вариантов проектирования проводилась с применением специализированного программного комплекса, позволяющего проводить математическое моделирование транспортной системы рассматриваемой территории, производить количественную оценку основных показателей транспортного потока для существующих условий, а также для перспективных горизонтов планирования. На примере г. Омска можно сделать вывод, что при реализации варианта 2 транспортный спрос на перемещения на пассажирском транспорте общего пользования является максимальным, что в совокупности с сокращением времени в пути позволяет сделать вывод о его наибольшей эффективности (таблица 3).

Расчет социально-экономической эффективности реализации мероприятий сбалансированного сценария развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации производился путем сравнения общественных затрат и результатов в случае осуществления этого проекта (проектный вариант) с теми затратами и результатами, которые будут иметь место при отказе от его реализации (базовый вариант). Результат отражен в расчете чистого дисконтированного дохода по формуле

Таблица 4
Оценка социально-экономической эффективности реализации сбалансированного варианта развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации

Table 4
Assessment of the socio-economic efficiency of the implementation of a balanced option for the developmen of transport infrastructure of the Omsk agglomeration

Годы	Эффект от снижения себестоимости перевозок грузов и пассажиров, тыс. руб.	Эффект от сокращения времени пребывания в пути пассажиров, тыс. руб.	Расходы, тыс. руб.	Эффективность (чистый дисконтированный доход), тыс. руб.
2019–2021	-234 792,50	86 597,70	325 806,28	-417 956,56
2022–2023	786 530,00	227 184,50	403 350,79	218 374,20
2024–2041	382 603 996,70	32 040 301,10	6 287 968,60	66 166 162,50
Итого	383 422 912,84	32 510 623,59	7 342 117,85	65 942 143,12

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T} (R_t - З_t) \times (1 + E)^{-t},$$

где R_t – эффект от реализации на t-год, тыс. руб.;

$З_t$ – капитальные затраты на t-год, тыс. руб.;

$(1 + E)^{-t}$ – коэффициент дисконтирования (норма дисконта, E= 0,12).

Расчет социально-экономической эффективности представлен в таблице 4.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальные варианты проектов составлялись на основании разработанных мероприятий по совершенствованию КСОДД на территории Омской агломерации с учетом их эффективности отдельно друг от друга и в совокупности и имеют различия в зависимости от объема мероприятий, эффекта от внедрения и стоимости реализации. Оценка эффекта от внедрения производилась с применением транспортной макромодели Омской агломерации на период, соответствующий сроку и очередности реализации мероприятий. Предложения по институциональным преобразованиям и совершенствованию нормативного правового и информационного обеспечения деятельности в сфере КСОДД разрабатывались на основании анализа действующих документов территориального и стратегического планирования и деятельности органов местного самоуправления. Остается надеяться, что все запланированные мероприятия будут реализованы в полном объеме и будет получен запланированный эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gelashvili, O. & Bezhanishvili, P. Modes of vehicles traffi condition and fuel effectiveness. Problems of Mechanics. 2012. No. 1(46). P. 39–43.

2. Nellore, K. & Hancke, G. A Survey on Urban Traffi Management System Using Wireless Sensor Networks. Sensors. 2016. Vol. 16. No. 2. P. 157.

3. Morchadze, T. & Rusadze, N. Ways To Address The Challenges In Passenger Traffi Within The Urban Transport Systems // Transport Problems. 2018. Volume 13. Issue 3. P. 65–77. DOI: 10.20858/tp.2018.13.3.6.

4. Cascetta, E. Transportation System Analysis: Models and Applications. Berlin: Springer. 2009.

5. Farrell, S. Financing European transport infrastructure: policies and practice in Western Europe. London: Macmillan. 1999. ISBN 033-37-189-68.

6. Ubbels, B. & Nijkamp, P. Unconventional funding of urban public transport. Transportation Research Part D. 2002. Vol. 7. No. 1, pp. 317–329.

7. Krawiec, S. & Łazarz, B. & Markusik, S. & Karoń, G. & Sierpiński, G. & Krawiec, K. Urban Public Transport With The Use Of Electric Buses – Development Tendencies // Transport Problems. 2016. Volume 11. Issue 4. P. 127–137. Doi: 10.20858/Tp.2016.11.4.12.

8. Nemtinov, V. & Nemtinova, Y. & Borisenko, A. & Mokrozub, V. Information Support Of Decision Making In Urban Passenger Transport Management // Transport Problems. 2017. Volume 12. Issue 4. P. 83-90. DOI: 10.20858/tp.2017.12.4.8.

9. Li, X. & Lv, Z. & Hu, J. & et al. Traffi Management and Forecasting System Based on 3D GIS. In: 2015 15th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE. P. 991–998.

10. Baldi, S. & Michailidis, I. & Ntampasi, V. & et al. Simulation-based synthesis for approximately optimal urban traffi light management. In: 2015 American Control Conference (ACC). IEEE. P. 868–873.

11. Makarova, I & Shubenkova, K & Gabsalikhova, L. Analysis Of The City Transport System's Development Strategy Design Principles With Account Of Risks And Specific Features Of Spatial Development// Transport Problems. 2017. Volume 12. Issue 1. P. 125–138. DOI: 10.20858/tp.2017.12.1.12.

12. Larsen, J. & Patterson, Z. & El-Geneidy, A. Build It. But Where? The Use of Geographic Information Systems in Identifying Locations for New Cycling Infrastructure. International Journal of Sustainable Transportation.

13. Buehler, R. Can Public Transportation Compete with Automated and Connected Cars? Journal of Public Transportation. 2018. Vol. 21. No. 1. P. 7–18.

14. TRB. Making Transit Work: Insight from Western Europe, Canada, and the United States. Transportation Research Board Special Report 257. Washington DC: National Academy Press. 2001. URL: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr257.pdf (06.11.2019).

15. Vuchic, V. Urban Transit: Operations, Planning, and Economics. Hoboken, NJ: Wiley & Sons. 2005.

16. Newman, P. & Kenworthy, J. Peak Car Use: Understanding the Demise of Automobile Dependence. World Transport Policy and Practice. 2011. No. 17(2). P. 31–42.

17. Shoup, D. The High Cost of Free Parking. Chicago: Planners Press, American Planning Association. 2011.

18. Evans, A.W. A Theoretical Comparison of Competition with Other Economic Regimes for Bus Services. Journal of Transport Economics and Policy. 1987. Vol. 21. P. 7–36.

19. Preston, J. An Overview of Public Transport Reforms in Great Britain and Forecasts for the Future. International Journal of Transport Economics. 2001. Vol. 28. No. 1. P. 23–48.

20. Wright, L. & Hook, W. Bus Rapid Transit Planning Guide. Institute for Transportation and Development Policy. New York. 2007. 836 p.

21. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September. 2015. № A/70/L.1. URL: http://www.un.org /ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (06.11.2019).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

22. Laporte, G. & Semet, F. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem. Montreal: Les Cahiers du GERAD. 1998. P. 98–54.

23. Эйрих, С.Н. Обзор методов решения задач маршрутизации транспорта // New Magenta Papers, 2012 №1. С. 22–29.

24. Gendreau, M. Metaheuristics for the vehicle routing problem / M. Gendreau, G. Laporte, J.- Y. Potvin // Technical Report CRT-963, Centre de Recherche sur les Transports. Universit de Montral, Jan. 1994. P. 44–50.

25. Колебер, Ю.А. Информационное обеспечение задач оптимизации маршрутной сети пассажирского транспорта общего пользования крупных и крупнейших городов: актуальность и подходы // Вестник СибАДИ. № 2. 2018. С. 218–228.

REFERENCES

1. Gelashvili O. & Bezhanishvili, P. Modes of vehicles traffi condition and fuel effectiveness. Problems of Mechanics. 2012; 1(46): 39–43.

2. Nellore K. & Hancke, G. A Survey on Urban Traffic Management System Using Wireless Sensor Networks. Sensors. 2016; 16. No. 2: 157.

3. Morchadze, T. & Rusadze, N. Ways To Address The Challenges In Passenger Traffi Within The Urban Transport Systems. *Transport Problems*. 2018; 13. Issue 3: 65–77. DOI: 10.20858/tp.2018.13.3.6.

4. Cascetta E. Transportation System Analysis: Models and Applications. Berlin: Springer. 2009.

5. Farrell S. Financing European transport infrastructure: policies and practice in Western Europe. London: Macmillan. 1999. ISBN 033-37-189-68.

6. Ubbels B. & Nijkamp P. Unconventional funding of urban public transport. *Transportation Research Part D.* 2002; 7. No. 1: 317–329.

7. Krawiec S. & Łazarz, B. & Markusik, S. & Karoń, G. & Sierpiński, G. & Krawiec, K. Urban Public Transport With The Use Of Electric Buses – Development Tendencies. *Transport Problems*. 2016; 11. Issue 4: 127–137. DOI: 10.20858/Tp.2016.11.4.12.

8. Nemtinov, V. & Nemtinova, Y. & Borisenko, A. & Mokrozub, V. Information Support Of Decision Making In Urban Passenger Transport Management. *Transport Problems*. 2017; 12. Issue 4: 83–90. DOI: 10.20858/tp.2017.12.4.8.

9. Li X. & Lv Z. & Hu J. & et al. Traffi Management and Forecasting System Based on 3D GIS. In: 2015 15th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE. P. 991–998.

10. Baldi S. & Michailidis, I. & Ntampasi, V. & et al. Simulation-based synthesis for approximately optimal urban traffi light management. In: 2015 American Control Conference (ACC). IEEE. P. 868–873.

11. Makarova I & Shubenkova, K & Gabsalikhova, L. Analysis Of The City Transport System's Development Strategy Design Principles With Account Of Risks And Specific Features Of Spatial Development. *Transport Problems*. 2017; 12. Issue 1: 125–138. DOI: 10.20858/tp.2017.12.1.12.

12. Larsen J. & Patterson Z. & El-Geneidy A. Build It. But Where? The Use of Geographic Information Sys-tems in Identifying Locations for New Cycling Infrastructure. International Journal of Sustainable Transportation.

13. Buehler R. Can Public Transportation Compete with Automated and Connected Cars? *Journal of Public Transportation*. 2018; 21. No. 1: 7–18.

14. TRB. Making Transit Work: Insight from Western Europe, Canada, and the United States. Transportation Research Board Special Report 257. Washington DC: National Academy Press. 2001. URL: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr257.pdf (06.11.2019).

15. Vuchic, V. Urban Transit: Operations, Planning, and Economics. Hoboken, NJ: Wiley & Sons. 2005.

16. Newman P. & Kenworthy J. Peak Car Use: Understanding the Demise of Automobile Dependence. World *Transport Policy and Practice*. 2011; 17(2): 31–42.

17. Shoup D. The High Cost of Free Parking. Chicago: Planners Press, American Planning Association. 2011.

18. Evans A.W. A Theoretical Comparison of Competition with Other Economic Regimes for Bus Services. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1987; 21: 7–36.

19. Preston J. An Overview of Public Transport Reforms in Great Britain and Forecasts for the Future. *Inter-national Journal of Transport Economics*. 2001; 28. No. 1: 23–48.

20. Wright L. & Hook W. Bus Rapid Transit Planning Guide. *Institute for Transportation and Development Policy*. New York. 2007. 836 p.

21. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September. 2015. № A/70/L.1. URL: http://www.un.org /ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (06.11.2019).

22. Laporte G. & Semet, F. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem. Montreal: Les Cahiers du GERAD. 1998: 98–54.

23. Eirikh, S.N. Obzor metodov resheniya zadach marshrutizatsii transporta. *New Magenta Papers*. 2012; 1: 22–29.

24. Gendreau M.G. Laporte J.- Y. Potvin Metaheuristics for the vehicle routing problem. Technical Report CRT-963, Centre de Recherche sur les Transports. Universit de Montral, jan. 1994: 44–50.

25. Koleber Yu.A. Informatsionnoe obespechenie zadach optimizatsii marshrutnoi seti passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya krupnykh i krupneishikh gorodov: aktual'nost' i podkhody [Information support of public passenger transport network optimization in major cities: relevance and approaches]. *Vestnik SibADI*. 2018; 2: 218–228.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия в разделы статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

The authors have equal contribution to the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафронов Эдуард Алексеевич (Россия, г. Омск) – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (СибАДИ), ORCID 0000-0002-7807-3897 (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sibadi1@ rambler.ru).

Сафронов Кирилл Эдуардович (Россия, г. Омск) – д-р техн. наук, проф., доц., проф. кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (СибАДИ), ORCID 0000-0003- 3849-6761 (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: transistem@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eduard A. Safronov – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Organization and Security Transportation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000- 0002-7807-3897 (644080, Russia, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: sibadi1@rambler.ru).

Kirill E. Safronov – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Vehicle Maintenance and Repair Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID ID 0000-0003-3849- 6761 (644080, Russia, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: transistem@rambler.ru).*

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 629.021
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-706-716

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САЙЛЕНТБЛОКА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГУКА И СЕН-ВЕНАНА

Д.А. Тихов-Тинников[1], В.С. Барадиев[1], А.И. Федотов[2], А.В. Алексеев[1]
[1]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия;
[2]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Сайлентблоки являются важной составной частью систем подрессоривания современных автотранспортных средств. Их свойства определяют не только комфортность передвижения на автомобиле, но и оказывают влияние на упругую характеристику подвески. При деформации сайлентблока в его силовой характеристике возможно появление линейных участков, которые целесообразно описывать с использованием математической модели, построенной на основе классических элементов Гука и Сен-Венана. В статье представлены математическое описание и результаты моделирования процесса функционирования цилиндрического сайлентблока, дана количественная оценка достоверности аппроксимации, определены области применения разработанной математической модели.*
Материалы и методы. *Исходными данными для исследования являются экспериментальные силовые характеристики цилиндрического автомобильного сайлентблока, полученные в гармоническом режиме при частоте от 0,03 до 51 Гц и амплитуде от 0,4 до 10 мм. Математическое описание модели определяется силовым балансом взаимодействующих между собой двух элементов Гука и одного элемента Сен-Венана. Расчеты выполнены с применением численных и оптимизационных методов.*
Результаты. *В ходе выполненных исследований получены функции, характеризующие изменение параметров элементов Гука и Сен-Венана от амплитуды деформации сайлентблока; расчетные силовые характеристики в виде зависимостей усилия сайлентблока от его деформации; количественные показатели достоверности аппроксимации экспериментальных данных разработанной математической модели.*
Обсуждение и заключение. *Выполненный анализ режимов работы модели показал возможность ее применения для описания процессов функционирования сайлентблока в стационарном гармоническом режиме при малых и средних амплитудах деформации. Исследование результатов моделирования при постоянных значениях параметров элементов Гука и Сен-Венана выявило теоретические предпосылки возможности использования модели для расчета усилия сайлентблока в нестационарном режиме.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *система подрессоривания автомобиля, резинометаллический шарнир, модель тела Гука, модель тела Сен-Венана, математическое моделирование, амплитуда, частота.*

Поступила 05. 11. 2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. *Выражаем искреннюю благодарность руководству Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления в лице ректора д-ра экон. наук, проф. Сактоева Владимира Евгеньевича и проректора по научной работе и инновациям, д-ра техн.наук, проф. Сизова Игоря Геннадьевича за поддержку и создание условий для выполнения работы по теме исследования.*

Для цитирования: Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С., Федотов А.И., Алексеев А.В. Математическая модель процесса функционирования сайлентблока на основе элементов гука и сен-венана. *Вестник СибАДИ.* 2019;16(6): 706–716. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-706-716

© Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С., Федотов А.И., Алексеев А.В.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-706-716

MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING PROCESS OF A RUBBER BUSHING ON THE HOOKE AND SAINT-VENANT ELEMENTS' BASIS

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov[1], Viktor S. Baradiev[1], Alexander I. Fedotov[2], Aleksey V. Alekseev[1]
[1]East Siberian State University of Technology and Management,
Ulan-Ude, Russia;
[2]Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *Rubber bushings are important parts of the spring systems of modern vehicles. The properties determine not only the comfort of car movement, but also affect the elastic suspension characteristics. When a bushing is deformed, linear sections appear in characteristics. It is advisable to describe such characteristics using a mathematical model based on the classical elements of Hooke and Saint-Venant. The paper presents a mathematical description of the bushing simulation functioning results, accuracy of approach, areas of application of the mathematical model.*
Materials and methods. *The initial data was the experimental characteristic of a cylindrical automobile rubber bushing, obtained in harmonic mode at the 0.03 to 51 Hz frequency and the 0.4 to 10 mm amplitude. The force balance of the two Hooke elements and one Saint-Venant element interacting with each other determined the mathematical model description. The authors carried out the calculations using numerical and optimization methods.*
Results. *As a result, the authors determined functions characterizing the change in the parameters of the Hooke and Saint-Venant elements from the rubber bushings' deformation amplitude. Moreover, the authors calculated power characteristics in the form of dependences of the rubber bushing effort and also found quantitative indicators of the reliability of the experimental data approximation by the developed mathematical model.*
Discussion and conclusions. *The analysis of the operating modes shows the possibility of the model application to describe the rubber bushing functioning in a stationary harmonic mode with small and medium strain amplitudes. The simulation results of the Hooke's and Saint-Venant's parameters reveals the theoretical prerequisites for the possibility of using the model to calculate the bushing force in an unsteady mode.*

KEYWORDS: *car suspension, rubber bushing, Hooke element, Saint-Venant element, mathematical modeling, amplitude, frequency.*

Submitted 05.11.2019, revised 17.12.2019.
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.

ACKNOWLEDGMENTS. *The authors express their sincere gratitude to the leadership of the East Siberian State University of Technology and Management, namely to the Rector, Doctor of Economics, Professor, Vladimir E. Saktoev and to the Vice-Rector in Research and Innovation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Igor G. Sizov for support and creation of conditions for research process.*

For citation: Tikhov-Tinnikov Dmitry A., Baradiev Viktor S., Fedotov Alexander I., Alekseev Aleksey V. Mathematical model of the functioning process of a rubber bushing on the hooke and saint-venant elements' basis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 706–716 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-706-716

© Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S., Fedotov A.I., Alekseev A.V.

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

ВВЕДЕНИЕ

Резинометаллические шарниры, или сайлентблоки,[1] [1] применяются в автомобильных системах подрессоривания для обеспечения демпфирующего эффекта, задания эластокинематических свойств подвески и компенсации производственных допусков. Являясь составной частью подвески, сайлентблоки также оказывают влияние на ее упругую характеристику. Резинометаллический шарнир представляет собой эластомерный полый цилиндр, установленный между внешней и внутренней втулкой. Втулки, соединенные с компонентами системы подвески, передают усилия от колеса автомобиля к кузову или раме. В настоящее время ученое сообщество уделяет особое внимание исследованиям сайлентблоков, направленных на решение конструкторских задач в области снижения вибраций и улучшения комфортности движения наземных транспортно-технологических средств [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. В меньшей степени исследуются эксплуатационные изменения технического состояния резинометаллических шарниров [10, 11].

Характеристики сайлентблока определяются свойствами материала и геометрическими параметрами. Благодаря эластомерным материалам сайлентблок имеет нелинейные характеристики как по амплитуде, так и по частоте, что проявляется в виде гистерезисного отклика при гармоническом режиме возбуждения. Вибрация, передаваемая через шарнир, демпфируется вследствие нелинейной вязкоупругой природы эластомерного материала. При несимметричной форме сайлентблока его характеристика становится анизотропной, что позволяет получать разные отклики сайлентблока в зависимости от направления действия возмущающей силы. Усилия сайлентблока определяются не только значением мгновенной деформации, но и зависят от истории деформации в прошлом. В результате гистерезисная сила не может быть выражена алгебраической функцией мгновенного смещения и скорости. Эта особенность затрудняет моделирование и анализ процессов функционирования сайлентблоков в сравнении с другими нелинейными системами.

Существующие методы расчета характеристик резинометаллических шарниров обычно основываются на использовании эмпирических данных, что требует проведения большого объема экспериментальных исследований с применением специального лабораторного оборудования [12, 13]. Силовые характеристики сайлентблоков, представляющие собой зависимости изменения усилия *от величины деформации, определяют в стационарных режимах при гармоническом изменении возмущающего воздействия. Полученные данные аппроксимируются с использованием математических моделей, основу которых составляют классические тела (элементы) реологии – модели тел Гука, Максвелла и Сен-Венана*[2,3]. Наиболее часто математические модели эластомера основываются на комбинациях первых двух типов классических элементов. Деформация и ее первая производная по времени являются аргументами линейных функций, описывающих изменения усилий классических элементов Гука и Максвелла соответственно. Учитывая нелинейное изменение скорости от времени при гармоническом режиме, комбинация таких элементов всегда будет давать нелинейную характеристику усилия *сайлентблока от перемещения. Данные модели хорошо описывают результаты экспериментальных исследований, полученные при малых и больших амплитудах деформаций. В этом случае выходная силовая характеристика сайлентблока не имеет линейных участков. При малой амплитуде характеристика близка к правильному эллипсу, а при большой имеет растянутую* s-образную форму. На средних деформациях в характеристике возможно появление линейных участков, моделирование которых целесообразно выполнять с применением моделей тел Гука и Сен-Венана, усилия которых определяются только значением деформации и не зависят *от ее скорости. Комбинация таких элементов позволит более точно описать линейное изменение выходной характеристики сайлентблока в зоне средних амплитуд деформаций эластомера. Рассмотрим математический аппарат реализации данной модели, выполним количественную оценку ее достоверности и на основании произведенных расчетов определим возможные области ее применения.*

[1] Раймпель Й. Шасси автомобиля. М. : Машиностроение, 1983. 356 с.

[2] Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. М. : Наука, 1975. 832 с.

[3] Кулезнев В.Н. Основы физики и химии полимеров. М. : Высшая школа, 1977. 248 с.

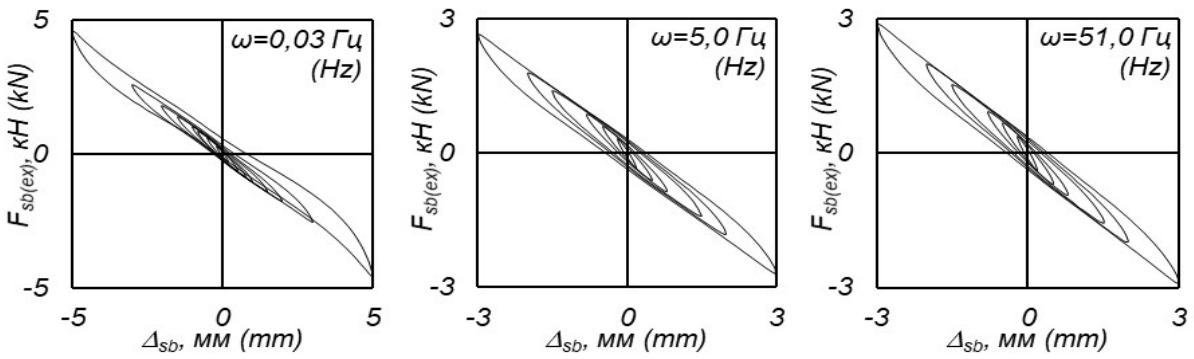
© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных данных примем результаты исследований цилиндрического автомобильного сайлентблока, полученные и опубликованные учеными Лундского университета (Швеция) [14, 15, 16]. Работа выполнялась совместно со специалистами Materials Centre of Volvo Car Corporation с использованием испытательного оборудования производства фирмы Schenck, обеспечивающего нагрузку на сайлентблок до 7 кН с частотой колебаний до 1 кГц, погрешность измерения не более 0,5%. Исходные данные были переведены из графических изображений в числовой формат с использованием программы «GetData Graph Digitizer». В результате получены массивы данных, характеризующих изменения усилия сайлентблока от перемещения с амплитудами А: 0,4; 1,0; 1,6; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0 и 10,0 мм; при частоте протекания процесса ω: 0,03 (псевдостатика) (рисунок 1, *а*); 5,0 (рисунок 1,б) и 51,0 Гц (рисунок 1, в).

Анализ характеристик показывает, что увеличение амплитуды деформации сайлентблока приводит к уменьшению тангенса угла наклона осевой линии петли гистерезиса и к изменению ее формы. При малых амплитудах при А≤2,0 мм петля гистерезиса представляет правильный эллипс на всех частотных режимах проведения испытаний. На средних деформациях при А, равном 3,0, 4,0 и 6,0 мм, на эллипсе появляются линейные участки. В зоне больших деформаций при А=10,0 мм (рисунок 1, *а*) характеристика сильно искажается и принимает s-образную форму (в дальнейших исследованиях данная характеристика не рассматривается).

Рассмотрим расчетную схему в виде механической модели на основе тел Гука и Сен-Венана (рисунок 2) для описания выше представленных изменений силовых характеристик при функционировании сайлентблока в зоне малых и средних деформаций. Модель представляет собой два параллельно работающих блока. Первый блок образует классический элемент Гука C_1, постоянно работающий при любой величине деформации. Второй блок состоит из двух последовательных элементов C_2 и F_f. Усилие, моделируемое данным блоком, определяется жесткостью и деформацией элемента Гука C_2 и при этом ограничено величиной трения в элементе Сен-Венана F_f. В общем виде выходную характеристику модели формируют четыре линейных участка *ab*, *bc*, *cd* и *da*. Участки *ab* и *cd* определяются жесткостью C_1 и трением F_f, на участках *bc* и *da* работают все три элемента модели.

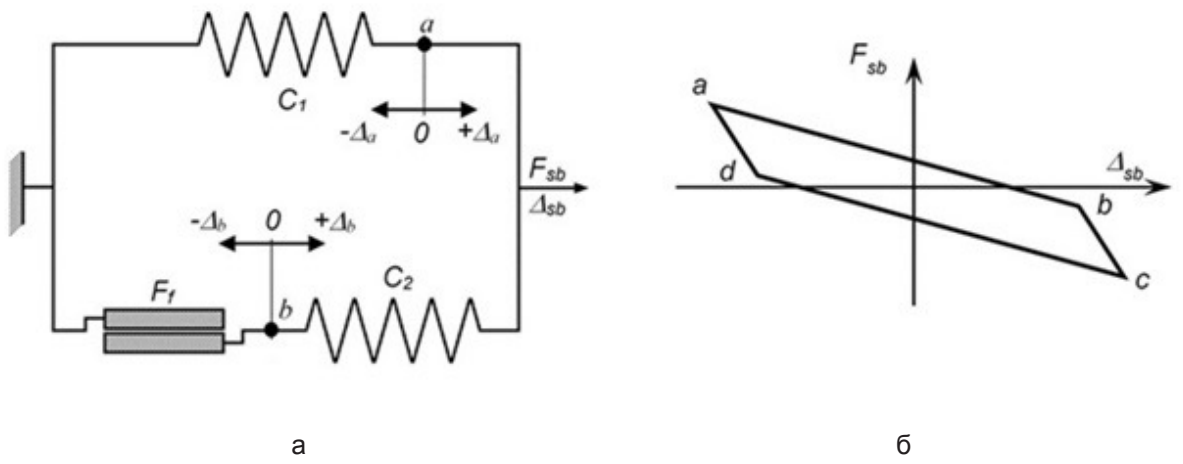


а б в

Рисунок 1 – Экспериментальные характеристики сайлентблока

Figure 1 – Experimental rubber bushing characteristics

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а б

Рисунок 2 – Механическая модель для расчета усилия сайлентблока на основе элементов Гука и Сен-Венана: а – расчетная схема, б – характеристика модели

Figure 2 – Mechanical model for calculating the efforts of the bushing based on the Hooke and Saint-Venant elements: a – design scheme; б – model characteristics

Математическое описание модели представляет усилие сайлентблока как сумму сил тел Гука, определяемых произведением жесткостей C_1 и C_2 на величину их деформаций Δ_a и Δ_b,

$$F_{sb} = C_1 \times \Delta_a + C_2 \times (\Delta_a - \Delta_b). \quad (1)$$

При этом скорости и координаты перемещения точек *a* и *b* зависят от соотношения сил, развиваемых телом Гука C_2 и телом Сен-Венана F_{fmax}, и определяемого условием

$$\dot{\Delta}_b = \begin{cases} \dot{\Delta}_a \rightarrow C_2 \times (\Delta_a - \Delta_b) > F_{f\max} \\ 0 \rightarrow C_2 \times (\Delta_a - \Delta_b) \leq F_{f\max} \end{cases}. \quad (2)$$

Изменение координаты точки *a*, являющееся величиной деформации сайлентблока Δ_{sb}, *задается* в виде гармонической функции времени

$$\Delta_a = \Delta_{sb} = f(t). \quad (3)$$

Определим для каждой из представленных на рисунке 1 экспериментальных силовых характеристик параметры модели C_1, C_2 *и* F_f. Исходя из расчетной схемы (см.рисунок 2) и выражения (1) можно утверждать, что усилие сайлентблока F_{sb} в стационарном гармоническом режиме при Δ_{sb} = 0 определятся только усилием тела Гука C_2:

$$F_{sb} = -C_2 \times \Delta_b. \quad (4)$$

Учитывая последовательное соединение тела Гука C_2 и тела Сен-Венана F_f верно утверждение о равенстве усилий, развиваемых данными телами,

$$F_f = C_2 \times \Delta_b. \quad (5)$$

Следовательно, величину трения F_f тела Сен-Венана можно определить из экспериментальных силовых характеристик как половину разности между максимальным $F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=0,\ max)}$ и минимальным $F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=0,\ min)}$ значениями усилия сайлентблока при Δ_{sb} = 0:

$$F_f = \frac{1}{2} \times \left(F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=0,\ \max)} - F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=0,\ \min)}\right). \quad (6)$$

Жесткость тела Гука C_1 вычислим также по экспериментальным данным исходя из того, что максимальное и минимальное усилие сайлентблока в стационарном гармоническом режиме определяются как

$$F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=\max)} = C_1 \times \frac{A}{2} + F_f, \quad (7)$$

$$F_{sb\ (ex,\ \Delta sb=\min)} = -C_1 \times \frac{A}{2} - F_f. \quad (8)$$

Откуда

$$C_1 = \frac{F_{sb\ (ex,\ \max)} - F_f}{0{,}5 \times A} = \frac{F_{sb\ (ex,\ \min)} + F_f}{0{,}5 \times (-A)}. \quad (9)$$

Жесткость тела Гука C_2 определим исходя из условия минимизации суммы квадрата раз-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ности между расчетными $F_{sb\,(i)} = f(C_2, \Delta_{sb})$ и экспериментальными $F_{sb\,(ex,\,i)}$ значениями усилия сайлентблока:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(F_{sb\,(i)} - F_{sb\,(ex,\,i)}\right)^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где n – количество экспериментальных значений в силовой характеристике.

Решая совместно выражения (1), (2) и (3), а также выполняя оптимизацию по условию (10) с использованием метода обобщенного приведенного градиента[4] [17], определяем искомую жесткость тела Гука C_2.

Полученные значения жесткости тел Гука C_1 и C_2 аппроксимируем по амплитуде A функцией

$$C_i = k_1 - \sin\left(k_2 \times arctan\left(k_3 \times \frac{A}{2}\right)\right), \quad (11)$$

где C_i – функция аппроксимации жесткости модели тела Гука при частоте, равной ω; k_1, k_2 и k_3 – коэффициенты, определяющие характер изменения жесткостей C_1 и C_2 от амплитуды A.

Для аппроксимации силы трения модели тела Сен-Венана Ff используем полином второго порядка:

$$F_f = k_4 \times \left(\frac{A}{2}\right)^2 + k_5 \times \frac{A}{2} + k_6, \quad (12)$$

где F_f – функция аппроксимации трения модели тела Сен-Венана при частоте, равной ω; k_4, k_5 и k_6 – коэффициенты, характеризующие зависимость изменения силы трения F_f от амплитуды A.

Усилие сайлентблока F_{sb} при изменении частоты его колебаний определяем методом интерполяции значений, полученных для известных значений частот 0,03 Гц, 5 Гц и 51 Гц.

Оценку степени соответствия результатов расчета производим при помощи коэффициента достоверности аппроксимации R^2.

Вычисления производим в программной среде Microsoft Excel для каждого значения амплитуды A и частоты ω, характеризующего *тестовый режим функционирования сайлентблока на лабораторном стенде*. Структура электронной таблицы с развернутыми формулами для вычислений представлена на рисунке 3.

	A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	O	P	Q	R
1	Параметры модели			Время, с	Перемещение эксперимент, X, м	Усилие эксперимент, Fex, Н	Перемещение точки b, расчет , Xb, м	Fpr2=C2·(X-Xb)	Fpr1=C2·X	Усилие расчет, F=Fpr1+Fpr2, Н	delta F =abs(F-Fex)	Σdelta F (параметр оптимизации)	(Fex-F)^2	Fex_сред	(Fex-Fex_сред)^2	R^2=1-Σ(Fex-F)^2/Σ(Fex-Fex_сред)^2
2	C1	764208	Н/м	0	0	303,09	0	=$B$3*(F2-H2)	=F2*$B$2	=-(I2+J2)-$B$5	=ABS(G2-K2)	=СУММ(L343:L683)	=(G2-K2)^2	=СРЗНАЧ(G343:G683)	=(G2-$P$2)^2	=1-(СУММ(O343:O683)/СУММ(Q343:Q683))
3	C2	591200	Н/м	0,011	-3E-05	330,82	=ЕСЛИ($B$4>ABS(I3);H2;H2+F3-F2)	=$B$3*(F3-H2)	=F3*$B$2	=-(I3+J3)-$B$5	=ABS(G3-K3)		=(G3-K3)^2		=(G3-$P$2)^2	
4	Ff	303,09	H	0,023	-7E-05	360,79	=ЕСЛИ($B$4>ABS(I4);H3;H3+F4-F3)	=$B$3*(F4-H3)	=F4*$B$2	=-(I4+J4)-$B$5	=ABS(G4-K4)		=(G4-K4)^2		=(G4-$P$2)^2	
5				0,035	-1E-04	391,51	=ЕСЛИ($B$4>ABS(I5);H4;H4+F5-F4)	=$B$3*(F5-H4)	=F5*$B$2	=-(I5+J5)-$B$5	=ABS(G5-K5)		=(G5-K5)^2		=(G5-$P$2)^2	

Рисунок 3 – Расчет параметров математической модели сайлентблока в программной среде Microsoft Excel (фрагмент)

Figure 3 – Calculation of the bushing mathematical model in the Microsoft Excel software (fragment)

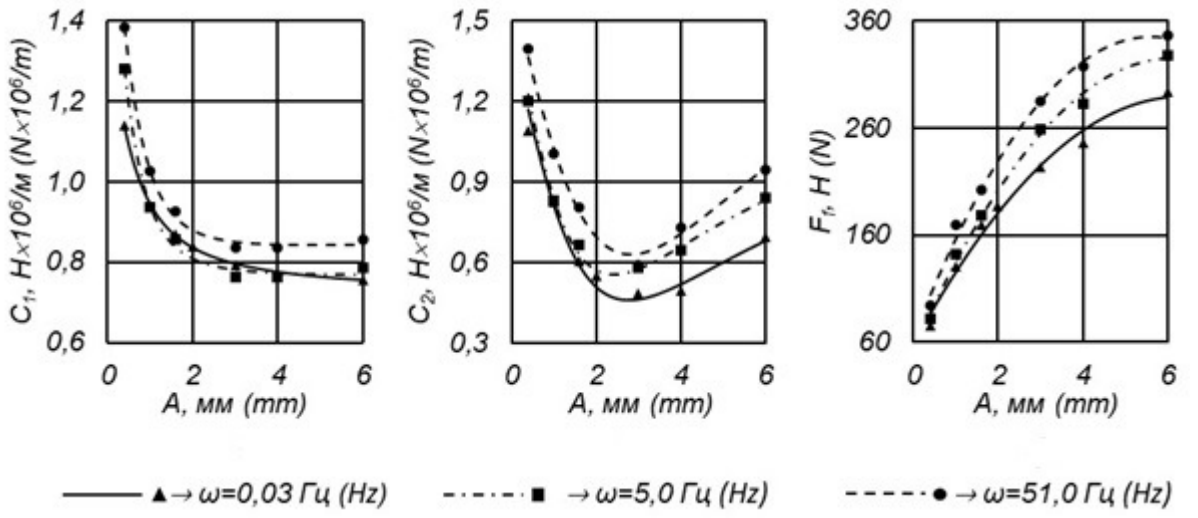
[4] Островский Г.М., Бережинский Т. А. Оптимизация химико-технологических процессов. Теория и практика. М. : Химия, 1984. 240 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя зависимости (1) –(10) применительно к имеющимся экспериментальным данным (см. рисунок 1), были определены значения параметров математической модели C_1, C_2 *и* F_f. На рисунке 4 данные параметры представлены в виде маркеров круглой, квадратной и треугольной форм. Линиями на том же рисунке отображаются аппроксимирующие функции (11) и (12), построенные на основе значений коэффициентов, представленных в таблице .

Итоговые расчетные характеристики, полученные совместным решением зависимостей (1) и (2), вычислены по двум вариантам. Первый вариант (расчет *1*) предусматривает использование в качестве аргументов значения параметров модели C_1, C_2 *и* F_f, рассчитанные с использованием аппроксимирующих функций. Во втором варианте (расчет *2*) аргументами являются параметры C_1 = 0,755 *Н*×10^6/м, C_2 = 0,692 *Н*×10^6/м и F_f = 293,4 Н, соответствующие псевдостатической характеристике при средней деформации сайлентблока, т.е. при ω = 0,03 *Гц и А* = 6,0 мм. Всего для каждого варианта рассчитано 19 характеристик, соответствующих числу наборов экспериментальных данных. На рисунке 5 в качестве примера изображены типовые характеристики, полученные в трех режимах: *а* – ω = 0,03 *Гц и А* = 6,0 мм; б – ω = 51,0 *Гц и А* = 3,0 мм; в – ω = 5,0 *Гц и А* = 0,4 мм. Остальные расчетные зависимости изменения усилия сайлентблока F_{sb} от его деформации Δ_{sb} подобны представленным характеристикам. В целях оценки качества описания разработанной математической моделью экспериментальных данных для всех расчетных характеристик вычислены коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 (рисунок 6).



а б в

Рисунок 4 – Параметры модели сайлентблока

Figure 4 – Parameters of the rubber bushing

Таблица
Параметры аппроксимирующих функций (11) и (12)

Table
Parameters of the (11) and (12) approximating functions

ω, Гц *(Hz)*	Элемент Гука C_1 *Element Hooke* C_1				Элемент Гука C_2 *Element Hooke* C_2				Элемент Сен-Венана F_f *Element Saint-Venant* F_f			
	k_1	k_2	k_3	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2	k_4	k_5	k_6	R^2
0,03	*1,38*	*0,47*	*2,94*	*0,999*	*1,46*	*1,96*	*0,75*	*0,962*	-23,0	145,75	58,24	0,989
5	1,77	1,07	2,569	0,995	1,55	1,94	0,87	0,992	-28,9	176,71	54,14	0,995
51	1,84	1,13	2,25	0,997	1,63	2,28	0,58	0,990	-35,7	200,02	65,37	0,993

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

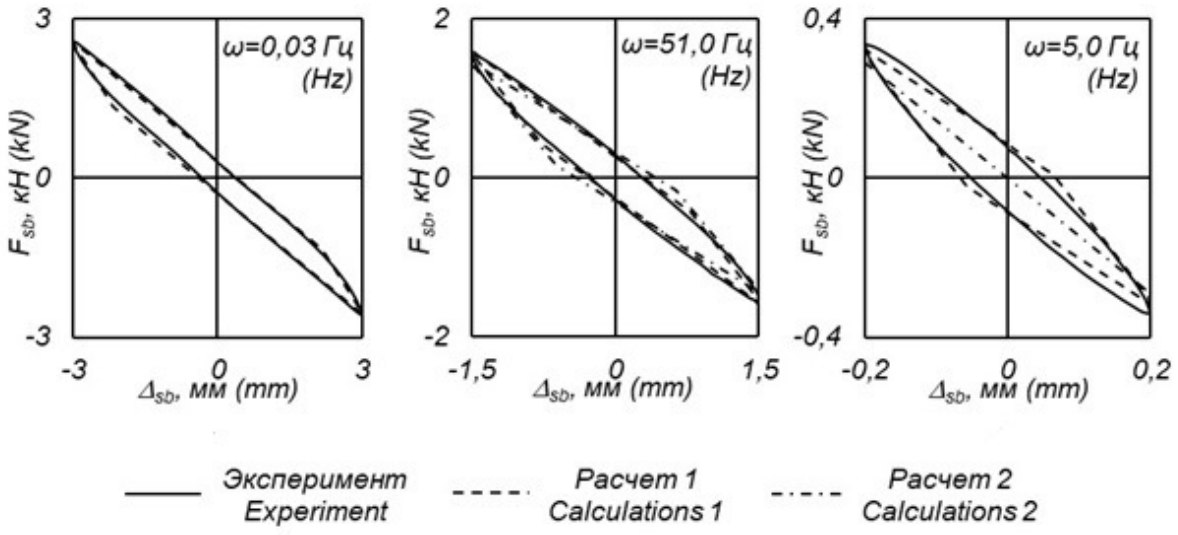


Рисунок 5 – Расчетные и экспериментальные характеристики сайлентблока

Figure 5 – Calculated and experimental characteristics of the rubber bushing

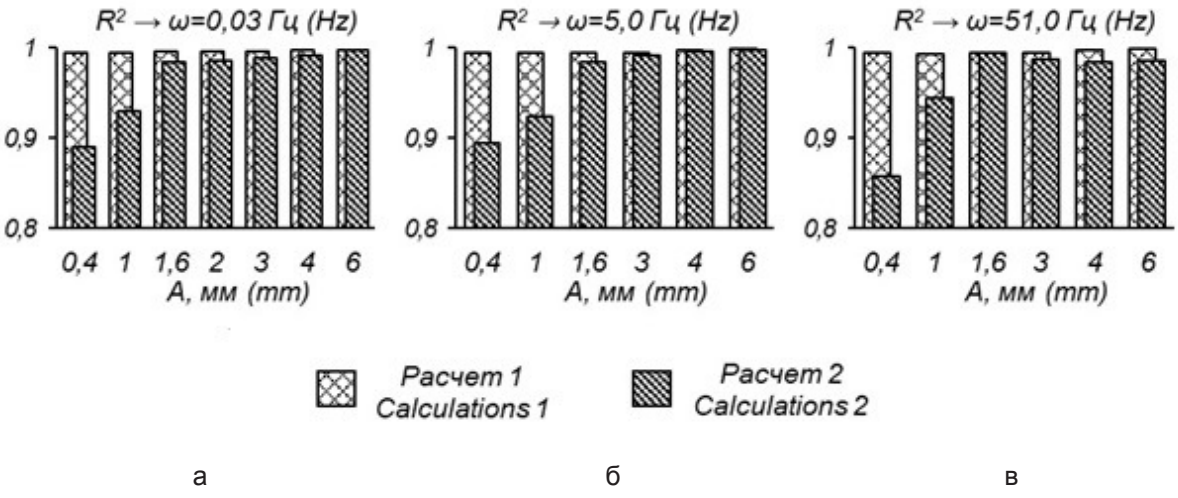


Рисунок 6 – Коэффициенты достоверности аппроксимации экспериментальных данных

Figure 6 – Reliability coefficients of the experimental data

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нелинейное изменение параметров C_1, C_2 и F_f (см. рисунок 4, маркеры) свидетельствует о наличии двух режимов работы математической модели. Первый режим характерен для малых деформаций сайлентблока, когда амплитуда A гармонического возмущающего воздействия не превышает 3,0 мм. Второй режим реализуется на средних деформациях при амплитуде от 3,0 до 6,0 мм. Большие деформации с амплитудой более 6,0 мм в данной работе не рассматриваются.

В зоне малых деформаций зависимости изменения жесткостей элементов Гука C_1 и C_2 (см. рисунок 4, *а* и 4, б) имеют убывающий характер. При средних деформациях параметр C_1 менее чувствителен к изменениям амплитуды (см. рисунок 4, *а*, маркеры), характер зависимости параметра C_2 становится возрастающим (см. рисунок 4, б). Трение элемента Сен-Венана F_f (см. рисунок 4, в, маркеры) возрастает во всем диапазоне амплитуды, но при этом имеет бóльшую интенсивность изменения в зоне малых деформаций. Рассчитанные коэффициенты k_1 – k_6 (см. таблицу) обеспечи-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

вают высокую достоверность аппроксимации выше представленных параметров C_1, C_2 *и* F_f, что подтверждает правильность выбора вида функций (11) и (12).

Двойственность режима работы математической модели свидетельствует о возможности описывать изменения усилия сайлентблока не только на средних, но и на малых деформациях. Данное утверждение подтверждается хорошей сходимостью экспериментальных данных и расчетов, выполненных с использованием рассматриваемых аппроксимирующих функций. Как видно из рисунка 5, расчетные характеристики (расчет 1) достаточно качественно описывают результаты экспериментов как по частоте, так и по амплитуде. Достоверность аппроксимации для данного варианта расчета (см. рисунок 6, расчет 1) находится в диапазоне от 0,993 до 0,999.

В случае функционирования сайлентблока в нестационарном режиме значения амплитуды и частоты являются неопределенными, что делает невозможным использование формул (11) и (12), а следовательно, и модели в целом. Практика экспериментальных исследований [18] показывает, что псевдостатические характеристики для зоны средних деформаций сайлентблока являются наиболее простыми с точки зрения их получения и при этом характеризуются максимальной точностью. В связи с этим замена функций, описывающих изменение параметров модели C_1, C_2 *и* F_f, на постоянные значения, определенные из такой псевдостатической характеристики, является возможным решением сложившейся проблемы. Данному условию соответствуют параметры, полученные из экспериментальной характеристики при ω = 0,03 Гц *и* A = 6,0 мм. Расчеты, выполненные по данному варианту, показывают, что наблюдается снижение качества модели в зоне малых деформаций. Расчетная характеристика из эллипса вырождается в прямую линию (см. рисунок 5, в, расчет 2), т.е. явление отставания усилия от деформации не моделируется. Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 *снижается до* диапазона от 0,857 до 0,895 (см. рисунок 6, расчет 2). При средних амплитудах деформации расчетная петля гистерезиса становится соизмеримой с экспериментальной и мало отличается от результатов, полученных по первому варианту модели (см. рисунок 5, *а*, б, расчет 2). Значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 *находятся в диапазоне* от 0,929 до 0,999 (см. рисунок 6, расчет *2*). Полученные в данном случае теоретические результаты требуют экспериментальной проверки и рассматриваются как предпосылки для разработки математического описания процесса функционирования сайлентблока в нестационарном режиме.

Таким образом, представленные выше зависимости и методы расчета формируют полуэмпирическую математическую модель, позволяющую рассчитывать усилие цилиндрического сайлентблока F_{sb} при его функционировании как в стационарном гармоническом, так и в нестационарном режиме в диапазонах частоты от 0,03 Гц до 51 Гц и амплитуды от 0,4 мм до 6 мм. Модель достаточно качественно описывает работу сайлентблока при малых и средних деформациях. Результаты моделирования нестационарного режима требуют экспериментальной проверки. В данном виде предложенное математическое описание сайлентблока может входить как составная часть в модели, предназначенные для расчета параметров функционирования систем подрессоривания АТС в стационарных гармонических режимах, например для моделирования процесса диагностирования подвески автомобиля на вибростендах [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reimpell Jörnsen, et al. The Automotive Chassis: Engineering Principles. SAE International, 2008., 444 p.

2. Rivas-Torres, Jonathan, et al. Analytical Design and Optimization of an Automotive Rubber Bushing. Shock and Vibration, vol. 2019, 2019, pp. 1–13, doi:10.1155/2019/1873958.

3. Fredette, Luke, and Rajendra Singh. Estimation of the Transient Response of a Tuned, Fractionally Damped Elastomeric Isolator. Journal of Sound and Vibration, vol. 382, 2016, pp. 1–12, doi:10.1016/j.jsv.2016.07.009.

4. Lee, Hyun Seong, et al. Prediction of the Dynamic Equivalent Stiffness for a Rubber Bushing Using the Finite Element Method and Empirical Modeling. International Journal of Mechanics and Materials in Design, vol. 15, no. 1, 2017, pp. 77–91., doi:10.1007/s10999-017-9400-7.

5. Zhao, Zihan, et al. Modeling and Verificatio of a New Hyperelastic Model for Rubber-Like Materials. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019, 2019, pp. 1–10, doi:10.1155/2019/2832059.

6. Aydemir, Eren, and Polat Sendur. Simplifie Transfer Function Approach for Modeling Frequency Dependency of Damping Characteristics of Rubber Bushings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 233, no. 10, 19 Sept. 2018, pp. 2518–2531, doi:10.1177/0954407018799773.

7. Horiuchi, Kentaro, and Shinichi Sakaguchi. Rubber Suspension Bushing Model Identified by General Design Parameters for Initial Design Phase. SAE Technical Paper Series, 3 Apr. 2018, doi:10.4271/2018-01-0693.

8. Korchagin, P A, et al. Improvement of Human Operator Vibroprotection System in the Utility Machine. Journal of Physics: Conference Series, vol. 944, 2018, p. 12059, doi:10.1088/1742-6596/944/1/012059.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

9. Корчагин П.А. Автоматизация проектирования виброзащитных систем автогрейдеров на основе их математического моделирования // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. №1 (35). С. 79–84.

10. Rabanizada, N., et al. “Experimental Investigation of the Dynamic Mechanical Behaviour of Chemically Aged Elastomers.” Archive of Applied Mechanics, vol. 85, no. 8, 21 Feb. 2015, pp. 1011–1023, doi:10.1007/s00419-014-0971-6.

11. Sang-Hin, L., et al. Research of rubber fatigue optimization under multiaxial loading. Journal of Mechanical Strength, no. 39, pp. 1457–1462, 15 Dec. 2017, doi:10.16579/j.issn.1001.9669.2017.06.033.

12. Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С. Оборудование для экспериментального определения силовых характеристик автомобильных сайлентблоков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. №8 (115). С. 176–181, doi:10.21285/1814-3520-2016-8-176-181.

13. Ok J. K., et al. Experimental study on the bushing characteristics under several excitation inputs for bushing modeling. International Journal of Automotive Technology, vol. 8, no. 4, 2007., pp. 455–465.

14. Karlsson, Fredrik, and Anders Persson. Modelling Non-Linear Dynamics of Rubber Bushings: Parameter Identification and Validation: Master’s Dissertation. Division of Structural Mechanics, LTH, 2003.

15. Austrell, Per-Erik. Modeling of Elasticity and Damping for Filled Elastomers. Lund University, Lund Institute of Technology, Division of Structural Mechanics, 1997.

16. Austrell, Per-Erik. Survey of Design Methods and Material Characteristics in Rubber Engineering: a Report in the NUTEK-VAMP Research Program. Lund University, Division of Structural Mechanics, 1998.

17. Rhinehart, R. Russell. Engineering Optimization: Applications, Methods, and Analysis. 2018, doi:10.1115/1.861opt.

18. Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В. С., Алексеев А. В. Экспериментальные исследования процесса функционирования сайлентблока подвески АТС // Вестник ВСГУТУ. 2018. №3 (70). С. 43–47.

19. Lozia, Z, and Zdanowicz, P. Simulation Assessment of the Impact of Inertia of the Vibration Plate of a Diagnostic Suspension Tester on Results of the EUSAMA Test of Shock Absorbers Mounted in a Vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 421, 2018, p. 022018, doi:10.1088/1757-899x/421/2/022018.

20. Dobaj, K. Simulation Analysis of the EUSAMA Plus Suspension Testing Method Including the Impact of the Vehicle Untested Side. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 148, 2016, p. 012034, doi:10.1088/1757-899x/148/1/012034.

REFERENCES

1. Reimpell Jörnsen, et al. The Automotive Chassis: Engineering Principles. SAE International, 2008., 444 p.

2. Rivas-Torres, Jonathan, et al. Analytical Design and Optimization of an Automotive Rubber Bushing. Shock and Vibration, vol. 2, 2019, pp. 1–13, doi:10.1155/2019/1873958.

3. Fredette, Luke, and Rajendra Singh. Estimation of the Transient Response of a Tuned, Fractionally Damped Elastomeric Isolator. Journal of Sound and Vibration; 382, 2016: 1–12, doi:10.1016/j.jsv.2016.07.009.

4. Lee, Hyun Seong, et al. Prediction of the Dynamic Equivalent Stiffness for a Rubber Bushing Using the Finite Element Method and Empirical Modeling. International Journal of Mechanics and Materials in Design; 15, no. 1, 2017: 77–91, doi:10.1007/s10999-017-9400-7.

5. Zhao, Zihan, et al. Modeling and Verificatio of a New Hyperelastic Model for Rubber-Like Materials. Mathematical Problems in Engineering; 2019, 2019: 1–10, doi:10.1155/2019/2832059.

6. Aydemir, Eren, and Polat Sendur. Simplified Transfer Function Approach for Modeling Frequency Dependency of Damping Characteristics of Rubber Bushings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; 233, no. 10, 19 Sept. 2018: 2518–2531, doi:10.1177/0954407018799773.

7. Horiuchi, Kentaro, and Shinichi Sakaguchi. Rubber Suspension Bushing Model Identified by General Design Parameters for Initial Design Phase. SAE Technical Paper Series, 3 Apr. 2018, doi:10.4271/2018-01-0693.

8. Korchagin, P. A., et al. Improvement of Human Operator Vibroprotection System in the Utility Machine. Journal of Physics: Conference Series, vol. 944, 2018, p. 012059, doi:10.1088/1742-6596/944/1/012059.

9. Korchagin, P. A. Automation of design of vibration protection systems graders on the basis of mathematical modeling. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil’no-dorozhnoj akademii*. 2014; 1 (35): 79–84 (in Russian).

10. Rabanizada, N., et al. Experimental Investigation of the Dynamic Mechanical Behaviour of Chemically Aged Elastomers. Archive of Applied Mechanics, vol. 85, no. 8, 21 Feb. 2015: 1011–1023, doi:10.1007/s00419-014-0971-6.

11. Sang-Hin, L., et al. Research of rubber fatigue optimization under multiaxial loading. Journal of Mechanical Strength, no. 39, pp. 1457–1462, 15 Dec. 2017, doi:10.16579/j.issn.1001.9669.2017.06.033.

12. Fedotov, Aleksander, et al. Equipment For Experimental Determination Of Vehicle Silent Block Power Characteristics. *Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2016; 115, no. 8: 176–181, doi:10.21285/1814-3520-2016-8-176-181 (in Russian).

13. Ok J. K., et al. Experimental study on the bushing characteristics under several excitation inputs for bushing modeling. International Journal of Automotive Technology. 2007; 8, no. 4: 455–465.

14. Karlsson, Fredrik, and Anders Persson. Modelling Non-Linear Dynamics of Rubber Bushings: Parameter Identification and Validation: Master’s Dissertation. Division of Structural Mechanics, LTH, 2003.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

15. Austrell, Per-Erik. Modeling of Elasticity and Damping for Filled Elastomers. Lund University, Lund Institute of Technology, Division of Structural Mechanics, 1997.

16. Austrell, Per-Erik. Survey of Design Methods and Material Characteristics in Rubber Engineering: a Report in the NUTEK-VAMP Research Program. Lund University, Division of Structural Mechanics, 1998.

17. Rhinehart, R. Russell. Engineering Optimization: Applications, Methods, and Analysis. 2018, doi:10.1115/1.861opt.

18. Tihov-Tinnikov D. A., Baradiev V. S., Alekseev A. V. Experimental study of the bushing functioning process of the motor car's suspension. *Vestnik VSGUTU*. 2018; 70, no. 3: 43–47, https://vestnik.esstu.ru/archives/VestnikVsgutu3_2018.pdf (in Russian).

19. Lozia, Z, and Zdanowicz, P. Simulation Assessment of the Impact of Inertia of the Vibration Plate of a Diagnostic Suspension Tester on Results of the EUSAMA Test of Shock Absorbers Mounted in a Vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; 421: 022018, doi:10.1088/1757-899x/421/2/022018.

20. Dobaj, K. Simulation Analysis of the EUSAMA Plus Suspension Testing Method Including the Impact of the Vehicle Untested Side. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016; 148: p. 012034., doi:10.1088/1757-899x/148/1/012034.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тихов-Тинников Д.А. подготовил теоретический материал, выполнил расчеты на ЭВМ, написал рукопись и несет ответственность за плагиат, участвовал в анализе полученных результатов.

Барадиев В.С. выполнил расчеты на ЭВМ, участвовал в анализе полученных результатов.

Федотов А.И. и Алексеев А.В. участвовали в анализе полученных результатов.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov – theoretical material; computer calculations; responsible for plagiarism; analysis of the results.

Viktor S. Baradiev – computer calculations; analysis of the results.

Alexander I. Fedotov and Aleksey V. Alekseev – analysis of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доц., старший научный сотрудник управления научных исследований ФГБОУ ВО «ВСГУТУ», ORCID 0000-0003-0912-4109 (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1, e-mail: dm_tt@mail.ru).*

Барадиев Виктор Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Автомобили» ФГБОУ ВО «ВСГУТУ», ORCID 0000-0002-1725-2760 (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1).

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», Scopus Author ID 56341065000 (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

Алексеев Алексей Васильевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили» ФГБОУ ВО «ВСГУТУ», ORCID 0000-0002-4279-0683 (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher at the Research Department of the East Siberian State University of Technology and Management, ORCID 0000-0003-0912-4109 (670013, Ulan-Ude, 40B/1, Kluchevskaya St., e-mail: dm_tt@mail.ru).*

Viktor S. Baradiev – Senior Lecturer, Department of Cars, East Siberian State University of Technology and Management, ORCID 0000-0002-1725-2760 (670013, Ulan-Ude, 40B/1, Kluchevskaya St.).

Alexander I. Fedotov – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Road Transport, Irkutsk National Research Technical University, Scopus Author ID 56341065000 (664074, Irkutsk, 83, Lermontov St.).

Aleksey V. Alekseev – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Cars, East Siberian State University of Technology and Management, ORCID 0000-0002-4279-0683 (670013, Ulan-Ude, 40B/1, Kluchevskaya St.).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 625.7: 625.731
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745

АНАЛИЗ ПРИЧИН КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В настоящее время работы, направленные на уменьшение интенсивности колееобразований на автомобильных дорогах, являются актуальными. Мероприятия, направленные на повышение устойчивости дорожных одежд к колееобразованию включают в себя работы, нацеленные на решение материаловедческих задач, совершенствование методов расчета конструкций и разработки новых технологий для обеспечения высокого качества строительства.*
Материалы и методы. *Анализом данных натурных и лабораторных экспериментальных исследований установлены причины формирования колеи на покрытиях нежестких дорожных одежд. Приведена методика экспериментального исследования распределения проходов шин транспортных средств по ширине проезжей части и полос движения. Установлены коэффициенты для расчета числа нагрузок в центральных и краевых частях полос наката, а также в межколейном пространстве.*
Результаты. *Предложены конструкции дорожных одежд со скрытоколейными элементами, которые в целях борьбы с глубинной колеей размещаются на поверхности земляного полотна, а при борьбе с поверхностной колеей на основании дорожной одежды.*
Заключение. *В результате близкого расположения скрытоколейных элементов друг от друга грунт земляного полотна между ними испытывает компрессионное сжатие, при котором девиатор напряжений имеет наименьшее значение по сравнению с другими напряженными состояниями земляного полотна, обусловленными трехосным сжатием, возникающим как от подвижной нагрузки, так и от собственного веса дорожной одежды. Это способствует существенному снижению деформаций в грунте.*
Для успешного внедрения скрытоколейных дорожных одежд необходимо разработать новую или обоснованно выбрать известную методику расчета глубины колеи, которая необходима для проверки критерия колееобразования при расчете толщин скрытоколейных элементов и толщины дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *дорога, дорожное покрытие, колея, колея поверхностная, колея глубинная, полоса наката, боковой выпор колеи.*

Поступила 07.11.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления. *Вестник СибАДИ.* 2019;16(6): 718–745. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745

© Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745

RUTTING ON THE SURFACES OF NON-RIGID ROAD PAVEMENTS: ANALYSIS OF THE CAUSES AND RECOMMENDATIONS FOR REDUCING

Anatoliy S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Aleksandr L. Kalinin
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The works of reducing the intensity of rutting on the roads are relevant nowadays. Activities of improving the stability of road pavements include solving material problems, improving methods of calculation of structures and the development of new technologies to ensure high quality construction.*
Materials and methods. *The analysis of data of natural and laboratory experimental researches established the reasons of formation of the rut on coverings of non-rigid road pavements. The authors presented the technique of experimental research of the tires passes' distribution of vehicles on width of the traffic way and traffic lane. Moreover, the authors gave the coefficients for calculating the number of loads in the central and marginal parts of the coasting strips as well as in the inter-track space.*
Results. *As a result, the authors suggested designs of road pavements with hidden rut elements, which placed on a surface of a highway subgrade on the basis of road pavement.*
Discussion and conclusions. *As a result of the close proximity of the hidden track elements from each other, the soil of the subgrade between them experiences compression, in which the stress deviator is of the least importance compared to other stresses of the subgrade due to triaxial compression arising from both the moving load and its own weight pavement. The suggested variant helps to reduce significantly the deformation.*
For the successful implementation of hidden rut pavement, it is necessary to develop a new or reasonably choose a well-known method of calculating the depth of the rut, which is necessary to verify the criterion of gauge formation in the calculation of the thickness of hidden rut elements and the thickness of the pavement.

KEYWORDS: *road, road surface, rut, surface rut, deep rut, coasting strip, lateral track gauge.*

Submitted 07.11.2019, revised 17.12.2019.
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: Anatoliy S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Aleksandr L. Kalinin Rutting on the surfaces of non-rigid road pavements: analysis of the causes and recommendations for reducing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 718–745 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745

© Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L.

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

ВВЕДЕНИЕ

Колея, появляющаяся и развивающаяся на поверхности покрытий нежестких дорожных одежд, негативно отражается на потребительских свойствах автомобильных дорог. В первую очередь страдает безопасность движения. Дело в том, что колея препятствует отводу воды с поверхности покрытия, и в ней скапливаются атмосферные осадки. При движении по дороге с колеей, заполненной водой, водители стараются выбрать траекторию движения так, чтобы колеса транспортного средства располагались в межколейном пространстве. В этом пространстве поверхность покрытия увлажнена, но очищена стекающей водой от пыли и грязи. При такой схеме движения коэффициент сцепления шины с покрытием достаточный для передвижения со сравнительно высокой скоростью. При разъезде со встречным автомобилем водители меняют траекторию движения, и шины колес транспортного средства оказываются на полосах наката, в пределах которых расположена колея, заполненная водой. В этот момент времени коэффициент сцепления шины с покрытием уменьшается, а его величина зависит от скорости движения, глубины воды в колее, параметров шероховатости покрытия (макро- и микрошероховатость) [1, 2, 3]. Поэтому работы, направленные на борьбу с образованием колеи, актуальны для дорожной отрасли и позволяют уменьшать интенсивность ухудшения безопасности движения, снижения ровности и прочности дорожной одежды, поддерживать скорость движения на требуемом уровне.

Мероприятия по обеспечению устойчивости дорожных одежд к образованию колей можно разделить на три большие группы, к которым отнесем исследования в области материаловедения, конструирования и расчета дорожных одежд, разработки новых технологий и совершенствования методов организации строительства.

Материаловедческие решения направлены на:

– поиск составов смесей, обладающих каркасной устойчивостью к пластическому деформированию при испытаниях на сдвиг и трехосное сжатие, что актуально как для асфальтобетонных смесей [4, 5], так и для смесей из зернистых материалов [6, 7];

– разработку добавок, в том числе из отходов промышленности, к органическим вяжущим материалам, снижающих пластичность смесей, что эффективно для смесей и грунтов с органическим вяжущим [8, 9];

– исследования в области применения медленнотвердеющих вяжущих, позволяющих добиваться эффекта набора прочности в течение длительного периода [10], что повышает сопротивление смеси, обработанной такими вяжущими, накапливанию остаточных деформаций на длительном отрезке эксплуатации дорожной конструкции.

Новые технологии позволяют улучшать качество строительства и увеличивать однородность показателей прочности и деформируемости материалов в слоях дорожной одежды. Усовершенствованные способы организации строительства приводят к рациональным расчетам дальности транспортирования горячих асфальтобетонных смесей и обеспечению оптимального температурного режима их укладки и уплотнения [11, 12, 13].

Задачи, решаемые в области совершенствования расчетов дорожных одежд, дают возможность внедрять в практику проектирования новые решения, позволяющие конструировать деформационно-устойчивые слои из известных материалов. Критерием создаваемых методов расчета служит условие, в соответствии с которым фактическая глубина колеи, формирующаяся в результате накапливания остаточных деформаций, не может превышать предельных значений. Предельные значения глубины колеи оговариваются в нормативных и методических документах, а их обоснованию посвящены отдельные научные работы [14]. Для прогнозирования процесса развития колеи применяют численные методы[1] [15], аналитические решения [16, 17, 18, 19] и эмпирические формулы, полученные на основе лабораторных [20, 21, 22, 23] и натурных испытаний [24, 25, 26, 27, 28, 29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях рационального конструирования деформационно-устойчивых дорожных одежд представляют интерес данные натурных испытаний, позволяющие определить причины формирования колей в конструкциях из различных материалов и разной капитальности. Такие данные получены в рамках международной программы полномасштабных ускоренных испытаний покрытий (*Full-scale Accelerated Pavement Testing* «*f-sAPT*»), при реализации которой выполнены испытания дорожных конструкций в

[1] Горшков Н.И. Разработка и внедрение геомеханического обеспечения проектирования транспортных сооружений на основе метода конечных элементов: дис.…д-ра техн. наук по специальности 05.23.11. Хабаровск, 2016. 389 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Рисунок 1 – Кольцевые стенды [30, 31, 32]:
а – имитатор университета Кентербери (Новая Зеландия, южный остров);
б – имитатор Нантского университета (Франция);
в – имитатор Андского университета (Колумбия)

Figure 1 – Ring stands [30, 31, 32]:
а – simulator of the Canterbury University (New Zealand, South Island);
б – simulator of the Nantes University (France);
в – simulator of the Andes University (Colombia)

Австралии, Бразилии, Германии, Голландии, Китае, США (штаты Вирджиния, Дакота, Индиана, Калифорния, Канзас, Луизиана, Миннесота, Флорида и др.), Швеции, ЮАР, Японии. Безусловно, что такие экспериментальные данные уникальны и могут быть использованы во многих странах мира. Испытания проводятся при помощи кольцевых стендов, применяемых для специально построенных конструкций, или имитаторов колесной нагрузки, которые используют для испытаний дорожных одежд, как на опытных полигонах, так и конструкций на эксплуатируемых дорогах.

Кольцевые стенды приведены на рисунке 1 [30, 31, 32].

Кольцевые стенды применяют на опытных полигонах, на которых предварительно устраивают испытываемую конструкцию дорожной одежды. При строительстве дорожной одежды в нее устанавливают датчики, позволяющие измерять деформации [30, 32, 33]. Согласно ОДМ 218.2.091–2017[2] такие измерения называют тензометрическими наблюдениями, применяемыми для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций. Достоинством этих испытаний является возможность расположения датчиков по глубине как на границах раздела слоев, так и внутри слоя. При обработке данных можно судить о вкладе того или иного слоя дорожной одежды, а также

[2] ОДМ 218.2.091–2017 Геотехнический мониторинг сооружений инженерной защиты автомобильных дорог. – М. : Росавтодор, 2017. – 91 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

грунта земляного полотна в смещение поверхности покрытия, накопленное в результате воздействие нагрузки.

На рисунке 2 приведены линейные имитаторы подвижной нагрузки [34, 35, 36, 37], достоинством которых является возможность их транспортировки. Поэтому такие имитаторы применяют как для испытаний конструкций, построенных на опытных полигонах, так и дорожных одежд на эксплуатируемых участках дорог.

Анализ результатов данных испытаний позволяет определить условия, при которых определенный элемент дорожной конструкции вносит наибольший вклад в накопленную всей системой «дорожная одежда – земляное полотно» остаточную деформацию или глубину колеи на покрытии. Также имеется возможность исследования условий, при которых деформации материала конструктивного слоя являются деформацией сдвига.

Рисунок 2 – Имитаторы подвижной нагрузки [34, 35, 36, 37]:
а – Caltrans/UCPRC HVS; б – FloridaDOT; в – TxDOT MLS (обновленный вариант); г – Kansas APT;
д – Indiana DOT APTF; е – Louisiana DOTD ALF

Figure 2 – Moving load simulators [34, 35, 36, 37]:
a – Caltrans/UCPRC HVS; б – FloridaDOT; в – TxDOT MLS (updated version); г – Kansas APT;
д – Indiana DOT APTF; e – Louisiana DOTD ALF

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Одним из вариантов исследования глубин колей, формирующихся в результате деформирования дорожных конструкций, является отрывка траншей. Траншеи располагают перпендикулярно оси дороги, в них разбивают первоначальные поверхности слоев, закрепляя натянутым шпагатом, или прорисовывают мелом. Траншеи дают наглядное представление о деформировании поверхности каждого конструктивного слоя. Иллюстрация траншей и деформированных слоев дорожной одежды приведена на рисунке 3.

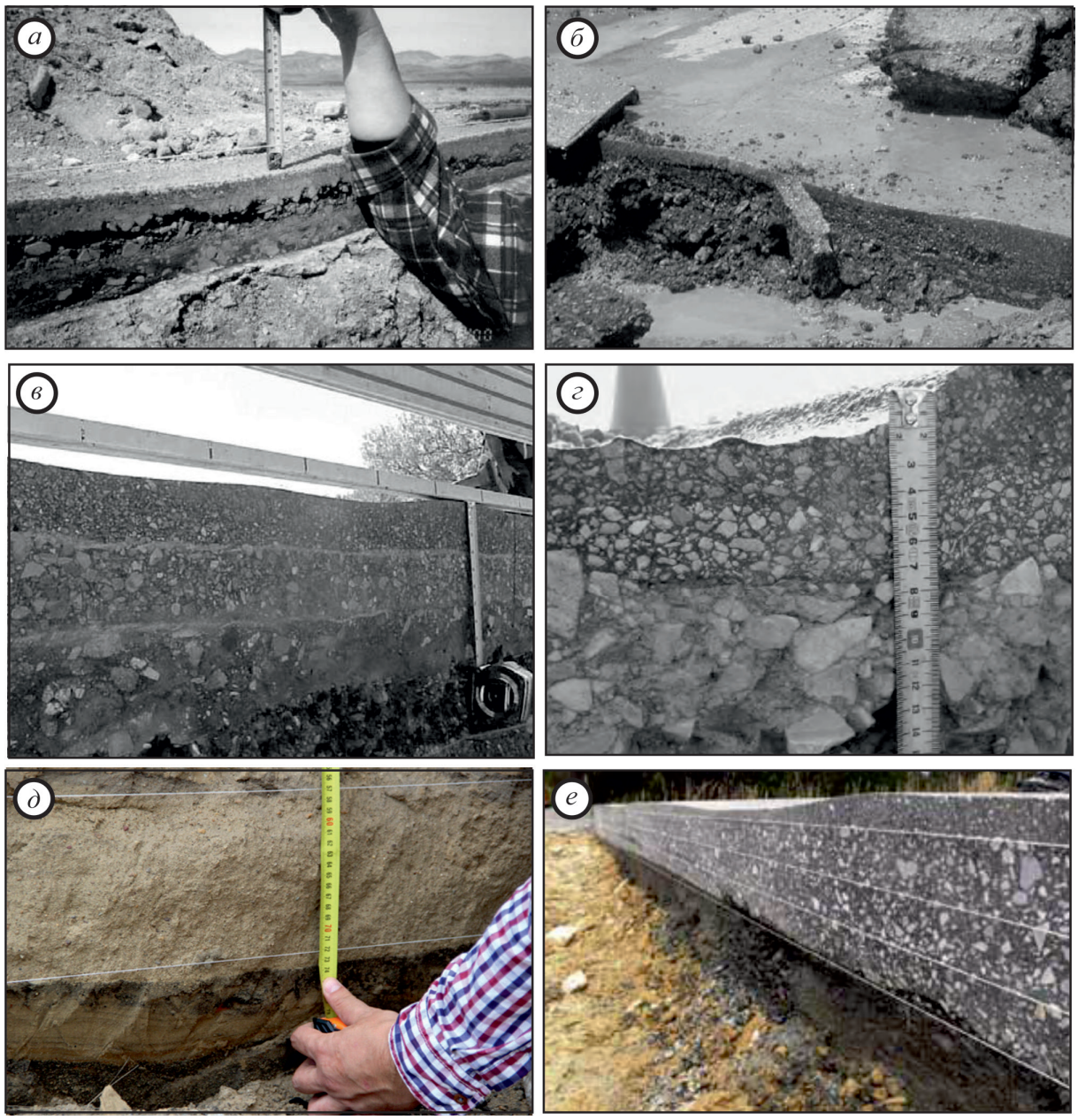


Рисунок 3 – Исследования деформирования слоев дорожной одежды в траншеях, отрытых перпендикулярно оси дороги [38, 43, 44, 45]:
а – шоссе SR 267 (Невада, США); б – шоссе SH 28 East (Миссисипи, США);
в – шоссе US 281 (Техас, США); г – шоссе US 64 East (северная Каролина, США);
д – улица 24-я Северная (Омск, Россия); е – шоссе S11 (США)

Figure 3 – Research of the layers' deformation on road pavements in trenches perpendicular to the axis of the road [38, 43, 44, 45]:
а – highway SR 267 (Nevada, USA); б – highway SH 28 East (Mississippi, USA);
в – highway US 281 (Texas, USA); г – highway US 64 East (North Carolina, USA);
д – 24, Severnaya St. (Omsk, Russia); е – highway S11 (USA)

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Нами проанализированы научно-технические отчеты [38, 39, 40, 41, 42] и публикации [32, 43, 44, 45], в которых приведены иллюстрации колей в траншеях, результаты измерений их глубин, деформаций поверхностей слоев и даны сведения о дорожной конструкции и условиях ее эксплуатации. На основе анализа выделили три модели условий развития колеи в нежестких дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием.

Анализируя данные рисунка 3,а,б, можно заметить, что основной причиной возникновения колеи является деформирование слоев, подстилающих однослойное асфальтобетонное покрытие. Боковые выпоры колеи, отчетливо просматривающиеся на рисунке 3,б, обусловлены деформациями основания из зернистого материала, который в данном случае испытывает деформации сдвига. Асфальтобетон в верхнем слое не имеет четко выраженных деформаций, а незначительное изменение толщины этого слоя может объясняться износом покрытия. При этом величина износа много меньше глубины колеи. Основной причиной колейности, возникающей в дорожных одеждах с покрытием переходного типа, характеризующихся суммарной толщиной слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, до 12 см, следует считать деформации, возникающие в слоях оснований из зернистых материалов и грунтах земляного полотна. Эти деформации носят упругопластический характер и обуславливаются двумя составляющими: уплотнением и сдвигом. Уплотнение возникает в результате воздействия шаровой составляющей тензора напряжений, а сдвиг – девиатора напряжений.

Объяснение такому поведению материалов можно дать из анализа методов расчета тонких пластин, базирующихся на гипотезах об их работе при изгибе. Расчетная схема тонкой пластины предполагает, что при ее изгибе материал не испытывает вертикальных нормальных напряжений или деформаций. При расчете тонких пластин вводится допущение об их плоском напряженном состоянии[3]. Такое допущение называют гипотезой о ненадавливании продольных волокон. Эта гипотеза постулирует, что вертикальное нормальное напряжение много меньше горизонтальных нормальных напряжений, вследствие чего вертикальное нормальное напряжение можно принять равным нулю[4]. Отсутствие вертикальных деформаций в тонкой пластине также является допущением, которое называют гипотезой плоских сечений или гипотезой Бернулли. Эта гипотеза постулирует, что поперечные сечения, плоские и перпендикулярные к оси балки до деформации, остаются плоскими и перпендикулярными к изогнутой оси после ее деформации.

Анализ данных рисунка 3,а,б позволяют утверждать, что к асфальтобетонным покрытиям одежд переходного типа применимы гипотезы изгиба тонких пластин. Следовательно, вертикальными деформациями асфальтобетона можно пренебречь, а причиной возникновения колеи следует считать деформации слоев из зернистых материалов основания и грунтов земляного полотна.

Усовершенствованные покрытия капитального типа, имеющие суммарную толщину слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, более 18 см, работают на изгиб как толстая плита и испытывают вертикальные компоненты напряжений и деформаций. Подобное деформирование приведено на рисунке 3,в и рисунке 3,е, причем на рисунке 3,е дана иллюстрация локализации деформаций в верхнем слое, так называемой «вечной» дорожной одежды [43]. Такая колея является поверхностной, формирующейся за счет деформирования слоев покрытия.

На рисунке 3, д и более детально на рисунке 4 приведены результаты наших исследований [44], иллюстрирующие накапливание деформаций в глинистом грунте земляного полотна дороги, расположенной по ул. 24-я Северная г. Омска. Особенностью ул. 24-я Северная является отсутствие грузового движения, наибольшими нагрузками значатся автобусы с коэффициентом приведения к расчетной нагрузке 0,7. Траншея устроена на расстоянии 10 м от пересечения с дорогой по ул. Герцена, а измерения выполнены: по правой стороне движения за светофорным объектом в пределах участка разгона транспорта и по левой стороне движения в пределах участка торможения транспорта перед светофором.

[3] Макаров Е.Г. Теория пластичности и ползучести для инженеров (курс лекций). – СПб : БГТУ-Военмех, 2017. – 140 с.

[4] Завьялов В.Н., Мартынов Е.А., Романовский В.М. Основы строительной механики пластин: учебное пособие – 2-е изд., испр. – Омск : СибАДИ, 2012. – 116 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

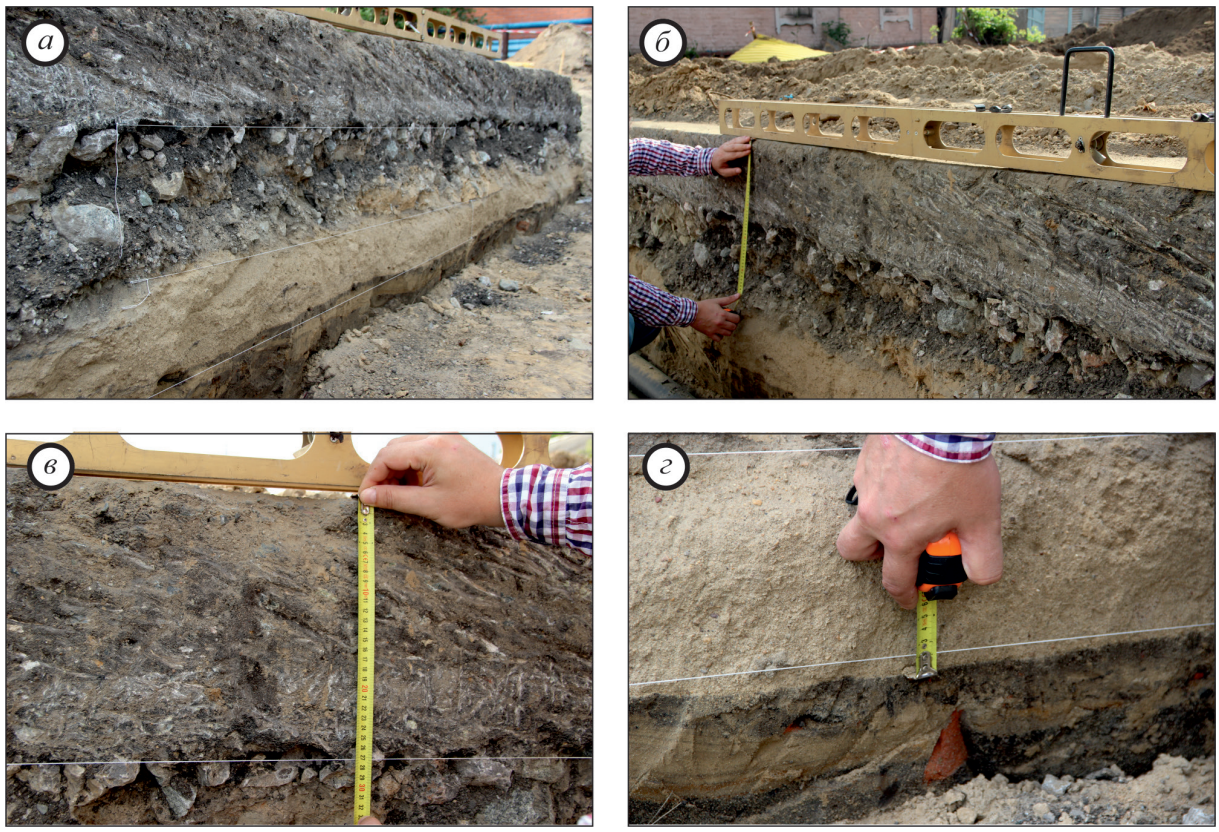


Рисунок 4 – Иллюстрации измерений толщин слоев дорожной одежды при обследовании колеи на участке разгона проезжей части по ул. 24-я Северная в г. Омске: а – общий вид траншеи с натянутым шпагатом между слоями; б – измерение толщин слоев между колей; в и г – измерения общей толщины асфальтобетонных слоев и деформации земляного полотна в сечении с максимальной глубиной колеи

Figure 4 – Illustrations of measurements of thickness of the layers of road pavements at survey of a rut on an acceleration lane of the traffic way on 24-ya Severnaya St. in Omsk: a – general view of the trenches with stretched twine between the layers; б – measurement of the thickness of layers between the cart-ruts; в and г – measure of the total thickness of asphalt layers and deformation of the highway subgrade in cross-section with the maximum rut depth

При обследовании дорожной одежды на участке разгона в траншее установлено, что глубина внешней колеи составляет 24 мм, а внутренней – 22 мм, причем суммарная толщина слоев из асфальтобетона 27 см в любой точке поперечного профиля. Деформация земляного полотна в центре внешней колеи составила 20 мм, а внутренней – 17 мм. Таким образом, вклад деформаций грунтов земляного полотна в глубину колеи будет 77% по внутренней колее и 83% по внешней колее. Поверхность дополнительного слоя основания из песка деформирована на 22 и 20 мм по внешней и внутренней колее. Таким образом, остаточные деформации, накопленные песчаным дополнительным слоем основания, составляют 2 мм по внешней колее и 3 мм по внутренней колее. Следовательно, вклад деформаций песчаного слоя в глубину колеи будет 8% по внешней колее и около 14% по внутренней колее. Оставшаяся часть деформации 2 мм накоплена щебеночным основанием толщиной 18 см. Таким образом, вклад щебеночного основания во внешнюю и внутреннюю колею составил 8% и 9% соответственно. Такая колея носит глубинный характер и иллюстрирует отсутствие остаточных деформаций слоев в слоях из материалов, содержащих органическое вяжущее. Примечательно, что на участке разгона транспорта отсутствовал износ поверхности покрытия, хотя в г. Омске 6 месяцев в году покрышки на колесах легкового транспорта имеют шипы.

На противоположной стороне движения, то есть в пределах участка торможения, наблюдалась несколько иная картина. На данном участке суммарная толщина асфальтобетонных слоев в колее на 3 мм меньше суммар-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ной толщины этих слоев между колей. Общая глубина внешней колеи 33 мм, а внутренней 29 мм. Так, вклад износа покрытия и деформаций уплотнения асфальтобетона транспортом в глубину колеи можно характеризовать от 9% до10%. Деформация щебеночного основания составила те же 2 мм, но его вклад в глубину колеи уменьшился до 6% и 7% соответственно по внешней и внутренней колее. Деформации песчаного слоя будет по внутренней колее 3 мм, а по внешней – 4 мм. Поэтому вклад щебеночного основания в общую глубину колеи составляет 10–12%. Деформации земляного полотна по внешней и внутренней колее 21 и 24 мм соответственно. Значит, вклад грунта земляного полотна в глубину колеи 72–73%.

Усовершенствованные покрытия облегченного типа, характеризующиеся суммарной толщиной слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, 12–18 см могут работать по одной из этих двух схем.

При нагреве асфальтобетонного покрытия облегченного или капитального типа до высоких температур, вязкость битумного вяжущего существенно уменьшается, и плита утрачивает способность работать на изгиб. В этом случае асфальтобетон и материалы, обработанные битумом, подобно зернистым материалам, испытывают трехосное сжатие, претерпевая деформации сдвига. Такая схема формирования колеи приведена на рисунке 3,г. Отличительной чертой такого деформирования является уменьшение толщины асфальтобетонного слоя в пределах полосы наката и ее увеличение в боковом выпоре. Колея носит поверхностный характер, но развивается за счет деформаций сдвига.

Попытки классификации колей принимались в различных работах [38, 39, 46]. Авторы работ [38, 46] колеи, формирующиеся на поверхности асфальтобетонных покрытий, разделяют на три типа, два из которых относятся к поверхностной колее, а один тип к глубинной колее. Поверхностная колея возникает вследствие износа материала покрытия или из-за нестабильности материала верхнего слоя, например асфальтобетона. Глубинная колея называется структурной колеей, обуславливающейся деформациями грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды, подстилающих покрытие.

Колея износа образуется за счет отделения частиц асфальтобетона с поверхности покрытия. Местами сосредоточения такой колеи являются участки торможения [46], а интенсивность ее развития возрастает в зимний период. Это объясняется двумя причинами. Авторы работ [38, 46] указывают, что при борьбе с зимней скользкостью на поверхность покрытия подаются абразивные материалы, например песок. Трение абразива о покрытие увеличивает износ [46]. В работе [47] исследовано влияние шипов на глубину колеи износа, а шипы рассматриваются в качестве главной причины износа. Таким образом, для образования колеи износа необходимыми условиями являются участки торможения и зимний период года.

С таким типом колеи мы столкнулись при обследовании покрытия автомобильной дороги по ул. 1-я Чередовая, расположенной в г. Омске, иллюстрации полевых измерений и отбора проб приведены на рисунке 5.

Колея, протяженностью 12 м, возникла на участке торможения непосредственно на съезде с ул. 1-я Чередовая на ул. Невского (рисунок 5, а). Ремонт обеих улиц выполнен в августе и сентябре 2016 г., а наше обследование датируется 13.11.2019 г., таким образом, отремонтированный участок эксплуатировался в течение 3 лет. Дорожная конструкция представляет собой существующую дорожную одежду, ремонт которой выполнен путем фрезерования асфальтобетонного покрытия на среднюю глубину 4 см и устройством двух новых слоев из горячих асфальтобетонных смесей. Нижний слой является выравнивающим слоем, он устроен из горячей пористой мелкозернистой смеси. Верхний слой толщиной 5 см выполнен из горячей, плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа А, марки II.

Глубина колеи определялась путем измерения максимального просвета под двухметровой рейкой, что соответствует требованиям ОДМ[5], а также требованиям ОДН 218.0.006–2002, являвшегося действующим нормативным документом на момент приемки автомобильных дорог и ввода их в эксплуатацию. Из анализа рисунка 5,а следует, что колея образовалась на участке торможения, и согласно рисунку 5,в имеет глубину 60 мм, что превы-

[5] ОДМ Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Ч. 1. Методика измерений и оценки эксплуатационного состояния дорог по глубине колеи. – М. : Росавтодор, 2002.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Рисунок 5 – Обследование колеи на дороге по ул. 1-я Чередовая в г. Омске: а – измерение глубины колеи под 2-х метровой рейкой; б – отбор кернов из колеи и между колей; в – результат измерения глубины колеи 60 мм; г – иллюстрации различий поверхностей кернов, взятых из колеи и между колей

Figure 5 – Inspection of the rut on the road surface on 1-ya Cheredovaya St. in Omsk: a – measure of the depth rut under the 2 meter rail; б – core drilling out of the rut and between the ruts; в- rut depth measurement result of 60 mm; г – illustration of differences in surface core drilling of the rut and between the ruts

шает предельные значения, регламентируемые ГОСТ Р 50597[6] для дорог, относящихся к группам улиц Б и В. Для определения причины формирования колеи использована методика, рекомендуемая ОДН[7], дополненная нами измерениями толщин кернов, взятых из дна колеи (в данном случае из внутренней колеи) и межколейного пространства, расположенного между внешней и внутренней колеями. Иллюстрация отбора приведена на рисунке 5, б.

При визуальном осмотре наше внимание привлекло различие поверхностей асфальтобетонного покрытия на дне колеи и между колей. Такое различие показано на примере отличий поверхностей кернов, представленных на рисунке 5,г. При измерении толщин обнаружили полное отсутствие верхнего слоя покрытия у кернов, взятых со дна колеи. У кернов, отобранных между колей, толщина верхнего слоя составила 4,8 мм, что на 2 мм меньше

[6] ГОСТ Р 50597–2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. Введен в действие 01.06.2018. Взамен ГОСТ Р 50597–93 – М. : Стандартинформ, 2017. – 28 с.

[7] ОДМ Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Ч. 3. Рекомендации по устранению колей на автомобильных дорогах. – М. : Росавтодор, 2002.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

проектной толщины. Керны доставлены в лабораторию и испытаны в соответствии с требованиями ГОСТ 12801–98[8] на предмет определения соответствия асфальтобетона и смеси требованиям ГОСТ 9128–2013[9]. В результате установлено, что асфальтобетон верхнего конструктивного и нижнего выравнивающего слоя и примененные для их устройства горячие асфальтобетонные смеси соответствуют всем требованиям государственного стандарта. Измерения толщин выравнивающего слоя в кернах, отобранных из одного и того же поперечного сечения со дна внутренней колеи и между колей, позволили сделать вывод об их одинаковых значениях. В соответствии с этим результатом констатировали отсутствие износа нижнего выравнивающего слоя. Поэтому причиной колеи является полный износ верхнего слоя покрытия из горячей, плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа А, марки II на величину 50 мм и деформирование нижележащих слоев существующей дорожной одежды и грунтов земляного полотна на величину 10 мм. Таким образом, на участках торможения износ покрытия является основной причиной образования колеи, обуславливающей ее глубину на 83%, и только 17% глубины колеи объясняется деформированием слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна.

Исследованию механизма износа покрытия посвящена одна из последних кандидатских диссертаций, выполненная А.И.Котовым [10]. Суть гипотезы А.И. Котова состоит в том, что процессу износа сопутствует образование в асфальтобетоне сетки пор, в которую попадает вода, а под воздействием нагрузки от колеса автомобиля вода создает поровое давление. Возникновение такого давления способствует интенсификации износа.

Этой интересной и новой гипотезе мы нашли экспериментальное подтверждение, полученное при обследовании колеи на автомобильной дороге по ул. Д. Бедного в г. Омске. Ремонт автомобильной дороги произведен одновременно с ремонтом дорог по ул. Невского и 1-я Челюскинцев. Работы на всех дорогах выполнены одним и тем же подрядчиком, приготавливавшим горячие пористую и плотную асфальтобетонную смесь на одном заводе из одинаковых материалов. Конструкции дорожных одежд одинаковые и включают в себя выравнивающий слой из горячей пористой асфальтобетонной смеси и верхний слой толщиной 50 мм из горячей плотной смеси типа А, марки II. Участок с колеей, обнаруженной на автомобильной дороге по ул. Д. Бедного, имеет протяженность 336 м и расположен от перекрестка с ул. 10-я Чередовая до перекрестка с ул. Полторацкого.

На обследуемом участке отбирались пробы асфальтобетона в виде кернов со дна колеи и между колей. Для отбора проб выбрано две точки: одна точка с колеей глубиной 30 мм в районе остановки ул. Полтарацкого, а вторая напротив дома 114 по ул. Д. Бедного (рисунок 6).

Обе точки отбора расположены в пределах одного прямолинейного участка. Первая точка находится в районе ост. «Ул. Полторацкого» на расстоянии 40 м от пешеходного перекрестка, то есть вне пределов участка торможения. Глубина колеи составляет 30 мм, а толщина верхнего слоя в кернах, отобранных со дна колеи, 42 мм, а в кернах, взятых между колей 45 мм. Значения контролируемых параметров обоих асфальтобетонов и их смесей соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2013. Таким образом, износ составляет 3 мм, а оставшаяся часть колеи глубиной 39 мм обусловлена деформациями материалов слоев оснований и грунтов земляного полотна. Коэффициенты уплотнения плотного асфальтобетона составили 0,99 для верхнего слоя и 0,98 для нижнего слоя, они соответствуют требованиям СП 78.13330.2012 и имеют такие же значения, какие были получены специалистами строительного контроля три года тому назад. Следовательно, деформации уплотнения асфальтобетона колесами транспортных средств за предшествующие нашим исследованиям теплые периоды эксплуатации дороги можно исключить. Это значит, что износом верхнего слоя покрытия объясняется 10% глубины колеи, а причиной формирования оставшейся части колеи глубиной 90% следует считать деформации земляного полотна и слоев дорожной одежды, подстилающих покрытие.

---

[8] ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. Введен в действие 01.01.1999. Взамен ГОСТ 12801-84. – М. : ГУП ЦПП, 1999. – 54 с.

[9] ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. Взамен ГОСТ 9128-2009. Введен в действие 01.11.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 51 с.

[10] Котов А.И. Повышение износостойкости покрытия автомобильной дороги при наличии влаги в верхнем слое. Автореферат дис. … к-та техн. наук по спец. 05.23.11. Воронеж, ВГТУ, 2019 – 19 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Рисунок 6 – Обследование колеи на дороге по ул. Д. Бедного в г. Омске: а – измерение глубины колеи в точке ост. «Ул. Полторацкого»; б – отбор кернов из колеи и между колей; в – результат измерения глубины колеи 30 мм; г – иллюстрации измерения толщины верхнего слоя асфальтобетонного покрытия; д – измерение глубины колеи в точке напротив д. 114 по ул. Д. Бедного; е – отбор кернов со дна колеи

Figure 6 – Survey of a rut on the traffic way on D. Bednogo St. in Omsk: a – measuring the depth of the rut at the point «ost. Poltoratskogo St.»; б – core drilling from the rut and between the ruts; в –result of measuring the depth of the 30 mm rut; г – illustrations of measuring the thickness of the asphalt surface course; д – measuring the depth of the rut at the point «opposite 114, D. Bednogo St.».; e – core drilling from the bottom of the ru.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

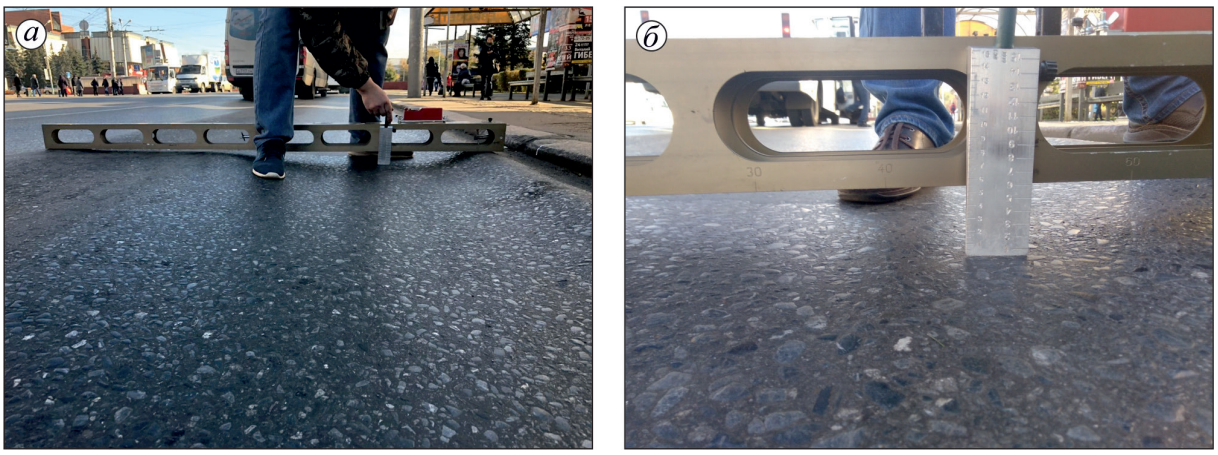


Рисунок 7 – Измерение глубины внешней и внутренней колеи на дороге по ул. Интернациональная: а – измерение глубины внешней колеи; б – результат измерения глубины внутренней колеи

Figure 7 – Measuring the depth of the external and internal rut on the traffic way on the International St.: a – external rut depth's measurements; b – result of measuring the depth of the internal rut

Во второй точке, напротив д. 114 по ул. Д. Бедного, глубина колеи составляет 25 мм, а разница толщин верхнего асфальтобетонного слоя в кернах, отобранных со дна колеи и между колей составляет 4 мм. Оставшаяся часть колеи глубиной 21 мм объясняется деформациями грунтов земляного полотна и материалами существующей дорожной одежды. Лабораторные испытания показали, что водонасыщение асфальтобетона в кернах, взятых со дна колеи, составляет 6,1%, а в кернах, отобранных между колей, оно равно 4,8%. Керны взяты из одного и того же поперечного сечения. Это значит, что покрытие в местах отбора проб устроено из смеси, привезенной одним и тем же самосвалом, причем из одного и того же замеса. Уплотнение произведено при одинаковых условиях. Однако в кернах, отобранных между колей, водонасыщение соответствует требованию «не более 5%», регламентируемому ГОСТ 9128–2013, а в кернах, взятых со дна колеи, этот параметр не соответствует требованиями стандарта. Отсюда следует вывод, что в процессе износа асфальтобетона в этом поперечном сечении в покрытии образовались дополнительные поры, которые могут создавать сетку, а при попадании в нее воды под воздействием транспортной нагрузки могут создавать дополнительное поровое давление, которое приводит к интенсификации процесса износа. Подтверждением этому служит увеличение величины износа от 3 мм (первая точка) до 4 мм (вторая точка). Причем для второй точки вклад износа в общую глубину колеи составляет 16%, а для первой точки 10%. Поэтому предложение А.И. Котова заслуживает внимания. При этом отметим, что обе точки полевых измерений и отбора проб находятся вне участков торможения транспорта и наибольший вклад в развитие колеи вносят деформации материалов в нижележащих слоях и грунтов земляного полотна. Этот вклад составляет 90% для первой точки и 84% для второй точки отбора.

Также следует отметить, что необходимо разрабатывать методики расчета дорожных одежд, позволяющие учитывать вклад процесса износа поверхности покрытия в глубину колеи. Кроме того, развитие сетки пор, происходящее в процессе износа асфальтобетона, свидетельствует об увеличении его поврежденности. Поэтому актуальны работы, выполняемые в направлении модификации методов расчета дорожных одежд, путем учета увеличения поврежденности асфальтобетона в процессе эксплуатации дороги.

Практический интерес вызывает изучение колей, образующихся в местах кратковременных стоянок транспортных средств и на участках подхода к ним. Такая колея обнаружена нами на дороге по ул. Интернациональная в г. Омске. На рисунке 7 приведена иллюстрация измерения глубины колеи в сечениях участка напротив остановки общественного транспорта «Главпочтамт».

Особенностью колеи на обследуемой дороге является то, что она распространена на протяжении всей улицы на участке от остановки «Кинотеатр В. Маяковского» до перекрестка с ул. Герцена. На основном протяжении глубина

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

колеи на момент обследования была одинаковая и составляла 4 мм, но в районе остановки «Главпочтамт» глубина колеи увеличивается и на крайней правой полосе движения достигает значений 72 мм по внешней полосе наката и 50 мм на внутренней полосе наката. Причем по длине колеи, равной 80 м, ее глубина изменяется, достигая максимальных значений в местах наиболее длительной стоянки автобусов. Результаты измерения глубин колей в сечениях, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга, приведены в таблице 1.

Ремонт дорожной одежды выполнен летом 2016 г, а обследования проведены 10.10.2018 г. Конструкция дорожной одежды представляет собой двухслойное асфальтобетонное покрытие с верхним слоем толщиной 50 мм из горячей плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б, марки II и нижним выравнивающим слоем из горячей пористой мелкозернистой асфальтобетонной смеси, а также существующей дорожной одежды и земляного полотна из суглинка легкого песчанистого. При выполнении ремонта существующее покрытие фрезеровалось на среднюю глубину 4 см, после чего выполнялось устройство выравнивающего и конструктивного асфальтобетонных слоев.

В пределах обследуемого участка колеи на крайней правой полосе останавливаются автобусы, интенсивность движения которых в обоих направлениях составляет 2953 автобусов в сутки. В ходе обследований из сечений, расположенных в пределах поперечных профилей, отбирались керны. Местом отбора, также как и в предыдущих случаях, служили дно колеи и пространство вне колеи, и боковые выпоры внешней колеи. В результате установлено, что разница толщин верхнего слоя в кернах, взятых со дна колеи и из боковых выпоров, составляет 2–4 мм. Отличие толщин верхнего слоя в кернах, взятых со дна колеи и между колей, находится в пределах 2–8 мм. Поэтому деформации сдвига асфальтобетона нами исключены, глубина колеи, обусловленная износом покрытия, может составлять до 8 мм. При этом нужно принимать во внимание факт отличия коэффициентов уплотнения. Асфальтобетон верхнего слоя в кернах, отобранных между колей и боковых выпоров, имеет коэффициент уплотнения 0,99, а в кернах, взятых со дна колеи, коэффициент уплотнения этого асфальтобетона составил 1,0 в двух пробах и 1,01 в одной пробе. Таким образом, асфальтобетон верхнего слоя в колее доуплотнялся в теплый период года нагрузкой от автобусов. Аналогичное различие коэффициентов уплотнения характерно для горячего пористого асфальтобетона выравнивающего слоя, его коэффициент уплотнения в кернах, отобранных между колей, составил 0,98, в кернах, взятых из боковых выпоров 0,98, а в образцах, извлеченных со дна колее 1,01 (два образца) и 1,0 (один образец). Поэтому часть колеи глубиной 8 мм обусловлена как износом верхнего слоя, так и уплотнением асфальтобетона в обоих слоях нагрузкой от автобусов.

Таблица 1
Результаты измерения глубины колеи по полосам наката

Table 1
Results of measuring the depth of the rut on the coasting strips

Полоса движения	Направление хода измерений	Адрес точки измерений ПК+	Глубина колеи, мм	
			Внешняя	Внутренняя
Крайняя правая	В сторону ул. Герцена	0+00	6	5
		0+10	22	20
		0+20	30	13
		0+30	55	24
		0+40	72	41
		0+50	55	50
		0+60	36	29
		0+70	30	24
		0+80	43	24

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

В этом случае износ асфальтобетона верхнего слоя и уплотнение асфальтобетона обоих слоев объясняет до 13% глубины колеи, причиной оставшихся 87% необходимо считать деформации грунтов земляного полотна и слоев существующей дорожной одежды. Причем в данном случае деформирование слоев основания из зернистых материалов и земляного полотна повлекло появление выпоров колеи, что свидетельствует о явном проявлении деформаций сдвига хотя бы в одном из этих слоев, то есть по аналогии с рисунка 3, б. На этом рисунке отчетливо виден выпор в слое из зернистого материала, образовавшийся в результате сдвига и ставший причиной выпора колеи на асфальтобетонном покрытии.

Считаем, что важным фактором, объясняющим большую глубину колеи на этом участке, является продолжительность действия нагрузки. Наибольшую глубину колея имеет в центральной части, то есть в месте наиболее длительной стоянки автобусов. В результате чего развивается деформация ползучести. Обнаруженные условия формирования колей в местах кратковременных стоянок требуют их более тщательного учета при проектировании дорожных одежд.

Для структурной (глубинной) колеи характерна практически одинаковая толщина слоев покрытия и основания дорожной одежды в колее и за ее пределами. По данным работы [38] основной причиной такой колейности являются остаточные деформации, накапливаемые в земляном полотне. Исследуя такие колеи, износ покрытия не обнаруживают или он незначителен, на что прямо указано в работе [38].

Колея, обусловленная нестабильностью материала верхнего слоя, объясняется возникновением деформации сдвига. Такая колея формируется по пути следования колеса, а за его пределами формируется боковой выпор [38].

В работе [39] выполнена классификация колей для дорожной одежды со слоями из зернистых материалов. Авторы выделили три типа колей. Колея первого типа образуется за счет деформаций уплотнения слоя из зернистого материала, уложенного на стабильное земляное полотно. Обязательным условием такого деформирования является отсутствие тяжелых нагрузок и хорошее уплотнение слоев из зернистых материалов и земляного полотна. Авторы работы [39] отмечают, что в районах с промерзающими грунтами данное деформирование может быть нарушено. Дело в том, что деформации морозного пучения приводят к разуплотнению грунтов земляного полотна, после чего они накапливают остаточные деформации. В этом случае, по данным авторов работы [39], колея первого типа может перейти в колею второго типа. Колея второго типа формируется за счет деформаций сдвига в грунте земляного полотна. Такая колея может возникать и без разуплотнения земляного полотна, для формирования необходимо возникновение больших напряжений, вызывающих деформации сдвига. Вторым условием образования колеи является существенное увлажнение земляного полотна, например в результате оттаивания грунтов, после глубокого сезонного промерзания [39]. Третий тип колейности обусловлен деформациями сдвига зернистого материала по поверхности скольжения, возникшей в слое. При достаточной толщине слоев дорожной одежды деформирования земляного полотна не происходит. Причина такой колеи состоит в промерзании и последующем оттаивании самого слоя из зернистого материала. В этом случае слой испытывает деформации сдвига, но в процессе эксплуатации повторно уплотняется транспортными нагрузками [39]. Данная колея характерна для северных стран [39].

Особый интерес представляют работы, в которых измерялись деформации поверхности слоев дорожной конструкции. На рисунке 8 приведены результаты измерения деформаций поверхностей слоев дорожных конструкций, представленных в таблице 2 [33]. Испытания проведены имитатором HVS, снабженным одним колесом со спаренной шиной, имеющей возможность смещать траекторию движения по ширине. Смещение проходов задается программой и необходимо для имитации распределения проходов шины по ширине полосы наката. Этот имитатор HVS находится в совместном владении Швеции и Финляндии.

Из анализа данных на рисунке 8 несложно определить, что по центру колеи в сечении x=0 глубина колеи на поверхности конструкции типа 1 составляет 61 мм, а типа 2 – 2–44 мм. Используя графоаналитический метод можно определить деформацию материала каждого слоя и вклад этого слоя в общую глубину колеи. Это реализуется путем определения местоположения поверхности рассматриваемого элемента конструкции до и после деформирования.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

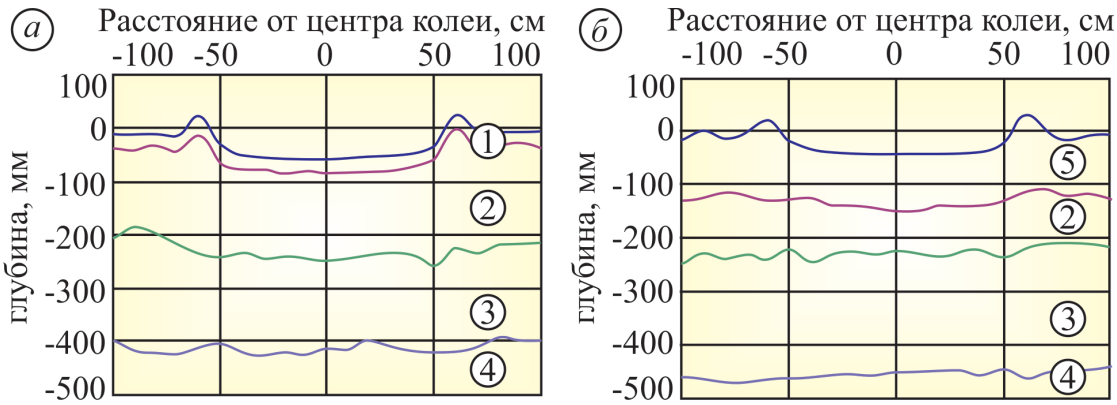


Рисунок 8 – Форма колеи и деформирование поверхностей слоев дорожных одежд [33]:
а – конструкция типа 1; б – конструкция типа 2;
1 – 5 конструктивные элементы, материалы которых приведены в таблице 2

Figure 8 – Shape of the rut and deformation of the surfaces of the road pavements' layers [33]:
а – type 1 construction; б – type 2 construction;
1 – 5 structural elements, the materials of which are given in the table 2

Таблица 2
Материалы слоев дорожных одежд рисунка 8

Table 2
Materials of the road pavements' layers on the figure

Номер на рисунке 8	Материал конструктивного слоя и модуль упругости	Толщина, мм	
		Тип 1	Тип 2
1	Слой износа	12	13
2	Зернистый материал, E=240 МПа	191	103
3	Зернистый материал, E=180 МПа	194	204
4	Земляное полотно (грунт песок), E=80 МПа	–	–
5	Зернистый материал, обработанный битумной эмульсией, соответствующей требованиям стандарта Швеции (BE 65M B180), E=600 МПа	–	91

Примечание: на рисунке 8, б положение нижней границы слоя износа не показано (на границе раздела слоев износа и покрытия датчики не устанавливались).

Начальное местоположение определяется суммой толщин слоев, расположенных выше рассматриваемого элемента. Местоположение поверхности этого же элемента конструкции после деформирования определяется по графику рисунка 8. Например, начальное местоположение поверхности земляного полотна в точке x=0 составит 12+191+194=397 мм, а ее местоположение на рисунке 8 составляет 414 мм. Следовательно, накопленная песчаным земляным полотном остаточная деформация в точке x=0 составляет 17 мм. Далее определяя местоположение поверхности нижнего слоя конструкции типа 1 до и после деформирования, и вычитая из их разности деформацию земляного полотна, получим, что деформация материала в этом слое составила 30 мм или 49% от глубины колеи.

В таблице 3 приведены результаты расчета деформаций, накапливаемых каждым элементом обеих дорожных конструкций, и указан их вклад в колею.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Деформации элементов дорожной конструкции

Table 3
Deformation of road structure elements

Тип конструкции	Материал конструктивного слоя	Деформация слоя, мм (%)
1	Слой износа	0 (0)
	Зернистый материал, E=240 МПа	14 (23)
	Зернистый материал, E=180 МПа	30 (49)
	Земляное полотно (песок), E=80 МПа	17 (28)
	Суммарная деформация всех элементов	61(100)
2	Зернистый материал, обработанный органическим вяжущим, E=600 МПа	1 (2)
	Зернистый материал, E=240 МПа	25 (56,8)
	Зернистый материал, E=180 МПа	-22 (-50)
	Земляное полотно (песок), E=80 МПа	40 (91)
	Суммарная деформация всех элементов	44(100)

Особенностью деформирования конструкции типа 2 является отрицательная деформация нижнего слоя дорожной одежды. Объяснением такому деформированию является разуплотнение слоя из зернистого материала. Разуплотнение происходит по двум причинам. На рисунке 8,б в сечении x=0 на поверхности этого слоя имеет место выпор материала. Таким образом, разуплотнение объясняется деформациями сдвига в этом слое и образованием выпора. Однако высота данного выпора меньше 22 мм. Поэтому деформация сдвига лишь отчасти объясняет разуплотнение зернистого материалов в этом слое. Рассматривая поверхности земляного полотна и нижнего слоя основания на рисунке 8,б можно заметить, что по всей ширине в пределах вариации x от -100 до 100 песчаная поверхность расположена ниже глубины 411 мм, на которой находилась эта поверхность до деформирования. Толщина нижнего слоя основания по всей ширине больше 204 мм, то есть после накатывания колеи толщина нижнего слоя увеличилась. Такому поведению материала можно дать только одно объяснение. В процессе деформирования нижний слой основания дорожной одежды копировал оседающую поверхность песчаного земляного полотна, и в процессе такого копирования несвязный зернистый материал испытал разуплотнение.

Отсюда следует, что определение вклада земляного полотна в накопленную на поверхности покрытия деформацию возможно, а расположенных выше него слоев из зернистых материалов затруднительно. Подтверждением служат данные эксперимента авторов работы [32], выполнивших испытания 5 конструкций на стенде, представленном на рисунке 1,б. Конструкции 1–4 имели однослойное асфальтобетонное покрытие толщиной 5 см (типы 1 и 2) и 8 см (типы 3 и 4). Основание этих дорожных одежд выполнено из зернистого материала толщиной 20, 35, 40 и 50 см. Конструкция типа 5 имела двухслойное асфальтобетонное покрытие суммарной толщиной 14 см и основание из зернистого материала толщиной 20 см. Земляное полотно выполнено из песчаных грунтов с модулем упругости 80–110 МПа. В процессе эксперимента приложено 1,5 млн нагрузок с измерением глубины колеи на поверхности с последующим устройством траншей и определением местоположения поверхностей слоев. Несмотря на проделанную работу авторы [32] отмечают, что вклад слоев в накопленную колею им определить не удалось. Тем не менее они установили, что в конструкциях типов 1–4 наибольшее деформирование происходит в слоях оснований из зернистых материалов и песчаных грунтах земляного полотна. В конструкции типа 5 вклад асфальтобетонных слоев значительный.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

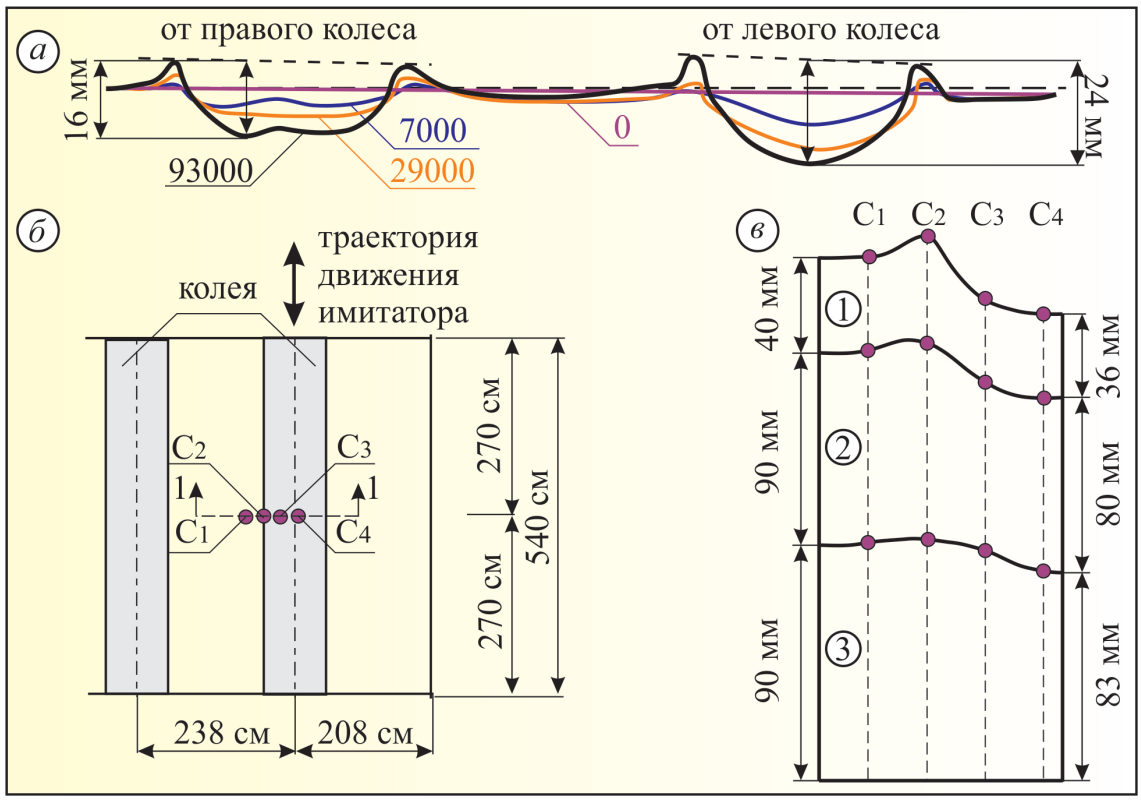


Рисунок 9 – Форма колеи и деформирование поверхностей слоев дорожных одежд из материалов, обработанных органическим вяжущим [48]:
а – история развития колеи от левого и правого колеса имитатора;
б – схема испытательного полигона и отбора кернов в местах C_1 – C_4;
в – схема деформирования слоев с указанием толщин в колее и за ее пределами

Figure 9 – Shape of the rut and deformation of the surfaces of the road pavements layers from materials treated with organic binder [48]:
a – history of rut development from left and right wheel simulator;
б – scheme of the test site and core drilling in places C_1 – C_4;
в – scheme of deformation of layers with the indication of thicknesses in a rut and beyond its limits

Данные рассмотренных нами экспериментов свидетельствуют о том, что слои из необработанных зернистых материалов нестабильны, а при передаче на земляное полотно сравнительно больших давлений его грунты способны накапливать большие деформации, составляющие значительную долю от глубины колеи на поверхности покрытия. Поэтому стабилизация зернистых материалов, например путем их обработки вяжущим, позволяет уменьшить интенсивность накапливания деформаций.

На следующем этапе исследования нами выполнен анализ данных о накапливании деформаций в дорожной одежде капитального типа. Данные такого эксперимента приведены в работе [48], а его результаты на рисунке 9.

Испытания выполнены имитатором ALT LAVOC (Швейцария), ось которого снабжена двумя колесами с одной шиной. В качестве критерия окончания испытания принята средняя глубина колеи 20 мм. Средняя глубина колеи определялась как среднеарифметическое значение глубин колеи от левого и правого колеса имитатора. Верхняя часть дорожной одежды включала слои из материалов, обработанных битумами различной вязкости, суммарной толщиной 22 см [48]. Подстилающий слой толщиной 28 см выполнен из песчано-гравийной смеси (0–60 мм), а земляное полотно из песка мелкого [48].

Анализируя данные рисунка 9,в несложно заметить, что суммарная деформация слоев, обработанных битумом от воздействия левого колеса имитатора, составила 21 мм, а общая глубина колеи 24 мм. Это соответствует данным рисунка 3, согласно которым деформации концентрируются в верхних слоях асфальтобетонных покрытий.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

Рисунок 10 – Иллюстрация эксперимента:
а – общий вид опытной станции; б –фиксация номеров полос при проезде шин

Figure 10 – Illustration of the experiment:
a – general view of the experimental station; б – fixing lane numbers by the tires' passing

Анализируя этот рисунок, обратим внимание на боковые выпоры колеи в двух верхних слоях, свидетельствующие о деформации сдвига в материалах, обработанных битумом. Отметим, что температура слоев при их испытании составляла 40 °С, а нагрузка на колесо имитатора 45 кН. Глубина колеи достигла предельного значения после приложения 93 000 нагрузок. Отсюда следует, что применение материалов, обработанных битумом, требует анализа условий эксплуатации (по параметрам нагрузки и погодно-климатическим данным). В противном случае колея накатывается при сравнительно малом числе проходов.

Выполнив анализ многочисленных экспериментальных данных и проведя обследования колей на улицах г. Омска (работы выполнялись ФГБОУ ВО «СибАДИ»), мы пришли к выводу о необходимости разработки конструктивных мероприятий, позволяющих выравнивать значения накапливаемых деформаций в пределах полос наката и межколейном пространстве. В данном аспекте практический интерес представляет устройство скрытоколейных дорожных одежд[11].

Исследование необходимо начать с изучения характера распределения проходов шин по ширине полос движения. Для этого на эксплуатируемых дорогах с параметрами проезжей части, соответствующими требованиям СП 34.13330.2012,[12] организовывались опытные станции. Суть эксперимента состояла в том, что на покрытие вдоль оси проезжей части наносятся продольные полосы, которые нумеруют в порядке возрастания от оси к кромке. Станция, организованная на автомобильной дороге Омск–Павлодар представлена на рисунке 10,а. На рисунке 10,б представлен момент проезда шин по пронумерованным сечениям.

Наблюдатель производил видеосъемку опытной станции, при помощи которой фиксировались номера полос, в пределах которых оказывались шины транспортного средства при его проезде через сечение дороги. Учету подлежали проходы шин грузовых автомобилей и автобусов. Этому обстоятельству служит то объяснение, что разрабатываемые нами конструктивные мероприятия предназначений для борьбы с колеей, обуславливающейся деформированием слоев оснований дорожных одежд из зернистых материалов и грунтов земляного полотна. При расчете таких деформаций расчетными являются нагрузки типа A_1, A_2 и A_3. Традиционно к данным расчетным нагрузкам одежд коэффициент приведения интенсивности движения легковых автомобилей принимается равным нулю. Поэтому в наших исследованиях распределение их проходов по ширине полосы движения не учитывалось. Тем не менее отметим, что для колеи износа воздействие шипованных шин легковых автомобилей является одним из наиболее значимых

[11] Фидловский Н.А. Скрытоколейные конструкции нежестких дорожных одежд внутрихозяйственных дорог колхозов и совхозов // автореф.…канд. техн. наук. Москва: 1987. 16 с.

[12] СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85. Введен в действие 01.07.2013. – М. : Госстрой России, 2013. – 109 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

факторов, и при разработке методов прогнозирования износа и мер борьбы с ним пренебрегать интенсивностью движения легковых автомобилей и ее распределением по ширине проезжей части нельзя. Однако специалисты в области трения и износа выделяют целый ряд разновидностей изнашивания контактирующих поверхностей. Поэтому разработка методики прогнозирования износа асфальтобетонного покрытия является сложной контактной задачей, требующей рассмотрения различных типов возможных износов и обоснования основного из них. Из этого следует, что для прогнозирования износа покрытия необходимо разработать принципиально новую методику приведения интенсивности движения легковых автомобилей и прочих транспортных средств к расчетной нагрузке.

Обработку результатов наблюдений по видеосъемке производили в камеральных условиях, фиксируя в ведомости номера полос, в пределах которых осуществлялся проезд шин. Данные учета распределения проходов шин приводили к проходам задней оси автомобиля, колеса которой снабжены спаренными шинами. При проезде такого автомобиля центр каждой шины оказывался в пределах строго определенной пронумерованной полосы. Для автомобилей с задней осью, снабженной шинами с одним баллоном для каждого колеса, фиксировали по две пронумерованные полосы, в пределах которых осуществлялся проезд. Независимо от числа шин, которыми снабжены задние оси транспортных средств, проезд каждого автомобиля позволял выделить 4 пронумерованные полосы, воспринимающие нагрузку.

Транспортные средства, подлежащие изучению распределения проходов шин по ширине проезжей части, были разделены на три группы. Первую группу составляли тяжелые и очень тяжелые грузовые автомобили, седельные тягачи, самосвалы, автопоезда. Ко второй группе отнесены средние и легкие грузовые автомобили, а к третьей группе – автобусы.

На рисунке 11 приведены результаты экспериментальных исследований распределения проходов шин тяжелых грузовых автомобилей, самосвалов, седельных тягачей и автопоездов по ширине проезжей части автомобильной дороги II технической категории с осевой разметкой 1.5 или 1.6 и краевой разметкой 1.2.1 или 1.2.2.

Из анализа данных рисунка 11 следует, что основное число проходов шин расположено в пределах полос шириной 90 см, у которых наиболее нагруженными являются центральные части шириной по 30 см, воспринимающие до 80% воздействий шин от общего числа нагрузок.

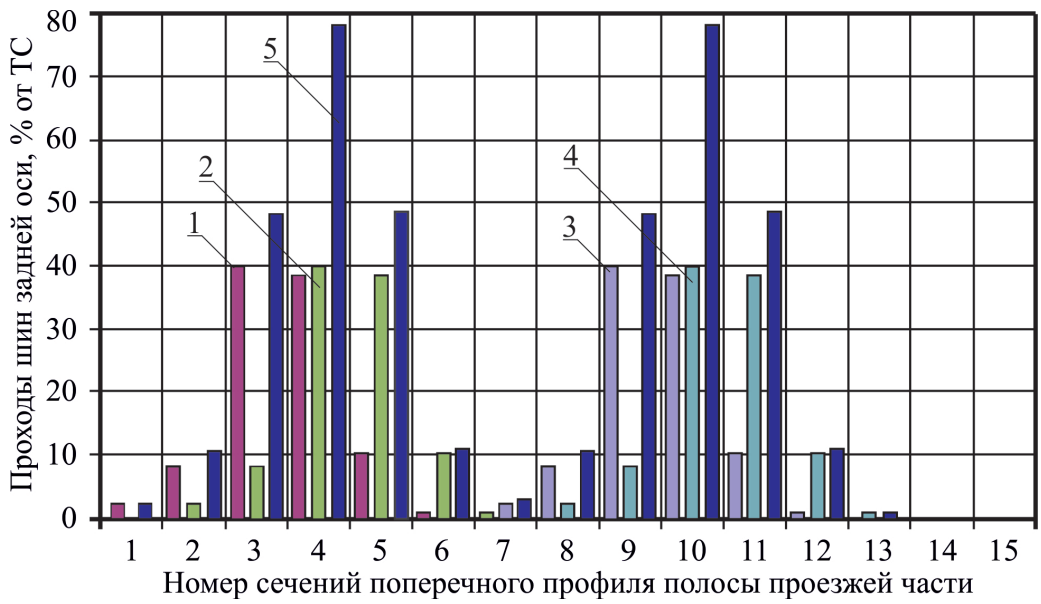


Рисунок 11 – Эпюры распределения проходов шин в пределах полосы движения дороги II технической категории: 1 и 2 – внешняя и внутренняя шина левого колеса; 3 и 4 – внутренняя и внешняя шина правого колеса; 5 – суммарная эпюра

Figure 11 – Plots of distribution of passes of tires within a lane of the road of the II technical category: 1 and 2 – external and internal bus of the left wheel; 3 and 4 – internal and external bus of the right wheel; 5 – total plot

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Краевые части шириной по 30 см воспринимают до 50% воздействий шин каждая. В межколейном пространстве реализуется 20% воздействий шин от каждого колеса.

Эпюры распределения проходов шин на рисунке 11 представлены в форме эмпирического дискретного распределения, но их можно обработать методами математической статистики, подобрав теоретический закон распределения проходов для каждой шины. В этом случае распределение будет непрерывным.

Авторы считают возможным выполнять подсчет количества нагрузок при помощи поправочных коэффициентов, задаваемых эмпирическим распределением, подобным распределению, представленному на рисунке 11 (суммарная эпюра). Такие данные можно применять для прогнозирования глубины колеи, причем они пригодны для использования в любом известном методе расчета. Это подтверждается тем, что эмпирические, механико-эмпирические и аналитические методы прогнозирования глубины колеи, независимо от типа математического аппарата, использованного при их разработке, содержат функцию числа нагрузок.

Методы определения числа расчетных нагрузок многократно модифицировались. В результате в инструкциях по проектированию дорожных одежд нежесткого (ВСН 46-72[13], ВСН 46-83[14], ОДН 18.046-01[15]) и жесткого типов (ВСН 197-83[16], ВСН 197-91[17] и ОДМ[18]) появлялись новые модифицированные формулы, заменяющие предыдущую методику расчета. Ориентируясь на зависимости ОДН 218.046–01, формулы для расчета суммарного числа приложения нагрузок в различных сечениях поперечного профиля полосы движения дадим в виде

$$\sum N_{\text{р}} = f_{\text{п}} \cdot \sum_{m=1}^{n} \left(N_{1m} \cdot K_{c} \cdot T_{\text{ргд}} \cdot 0{,}7 \right) \cdot S_{m\text{с}} \cdot k_{n} \cdot k_{mi} ,$$

где $f_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним; n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока; N_{1m} – суточная интенсивность движения автомобилей марки m в первый год службы (в обоих направлениях), авт/сут m; $S_{\text{тс}}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства марки т к расчетной нагрузке; $T_{\text{ргд}}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции; $К_{\text{с}}$ – коэффициент суммирования; k_{n} – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого; k_{mi} – введенный нами коэффициент распределения проходов шин автомобилей марки m по ширине полосы движения, определяющий их долю в центре i-го сечения, пронумерованного при эксперимента (рисунок 10, а).

Величина введенного нами коэффициента распределения проходов шин меньше 1. Поэтому в любом сечении, выделенном в пределах ширины полосы движения, суммарное число приложения расчетных нагрузок меньше, чем по нормативному документу.

В каждом сечении, выделенном в пределах ширины полосы движения, суммарное число приложения нагрузок индивидуально, поэтому поверхность поперечного профиля испытывает неодинаковые остаточные деформации по ширине. Отсюда возникает идея о повышении однородности деформирования дорожной одежды в пределах полосы движения за счет устройства неравнопрочной по ширине конструкции.

Для таких условий Н.А. Фидловский[19] предложил скрытоколейную конструкцию дорожной одежды. В этой конструкции основание из щебня в пределах полос наката укреплено битумом по способу пропитки. Конструкция имеет ограничения, связанные с тем, что способ пропитки позволяет устраивать слой толщиной не более 8 см. Такое усиление основания подходит для ограниченного числа приложения нагрузок.

---

[13] Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-72.– М. : Транспорт, 1973, – 110 с.

[14] Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83.– М. : Транспорт, 1985. – 157 с.

[15] Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218-046-01.– М. : ГСДХ Минтранса России, 2001. – 146 с.

[16] Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-83.– М. : Минтрансстрой, 1984. – 129 с.

[17] Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-91.– М. : Союздорнии, 1992. – 130 с.

[18] ОДМ Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд. – М. : Росавтодр, 2004.

[19] Фидловский Н.А. Скрытоколейные конструкции нежестких дорожных одежд внутрихозяйственных дорог колхозов и совхозов // автореф….канд. техн. наук. Москва: 1987. 16 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

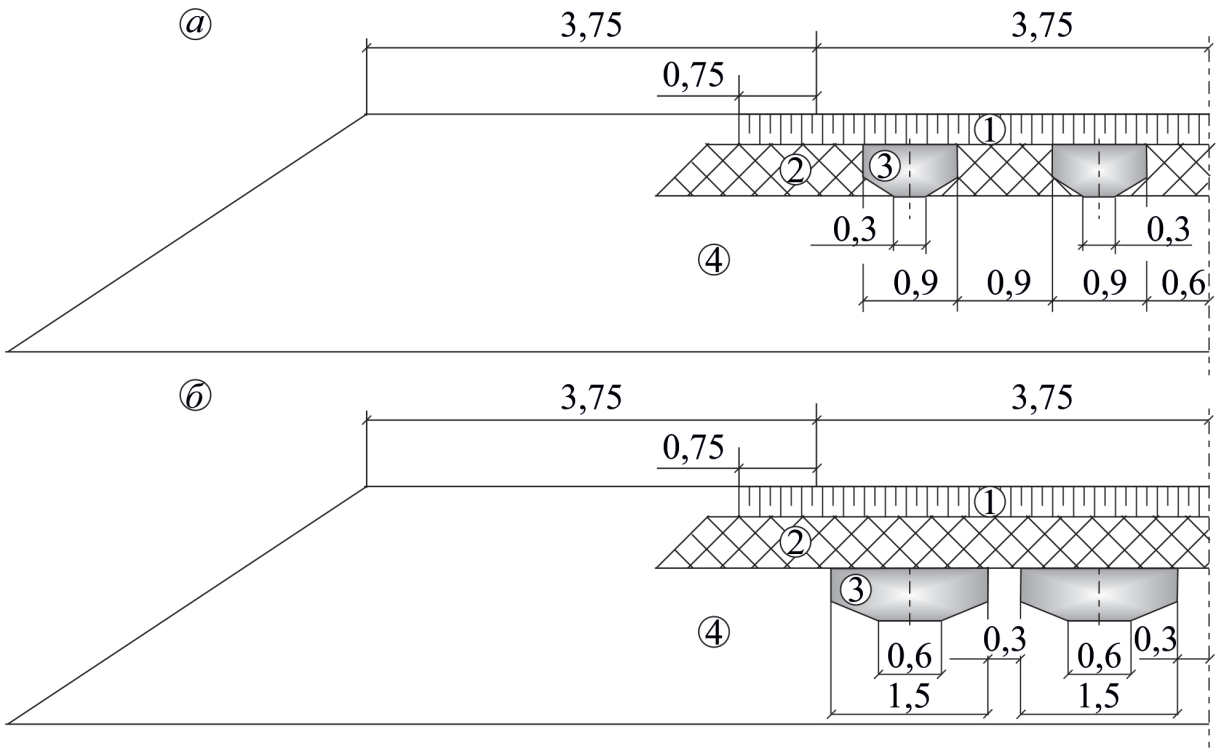


Рисунок 12 – Скрытоколейные дорожные одежды для дороги II технической категории:
а – с устройством скрытоколейного элемента в основании из зернистых материалов;
б – с устройством скрытоколейного элемента в земляном полотне;
1 – слои покрытия и основания из материалов, обработанных органическим вяжущим;
2 – слои из зернистых материалов; 3 – скрытоколейный элемент из материала или грунта, обработанного вяжущим; 4 – земляное полотно

Figure 12 – Concealed rut road pavements for road II technical category:
а – with the device hidden knee element in the base of granular materials;
б – with the device of the hidden rut element in the highway subgrade;
1 – coating and base layer of materials treated with organic binder;
2 – layers of granular materials; 3 – hidden knee element of the material or soil treated with a binder;
4 – subgrade

По мнению авторов, более эффективны скрытоколейные элементы, устраиваемые в траншеях, нарезанных в основании из зернистого материала или грунте земляного полотна. Современная техника позволяет разрабатывать траншеи с различным поперечным профилем, а доработка траншеи по шаблону позволяет добиваться полного копирования формы скрытоколейного элемента, рассчитанного при проектировании. Поэтому мы предлагаем две разновидности конструкций дорожных одежд, включающих в себя скрытоколейные элементы неодинаковой толщины по ширине полосы наката. Форма поперечного сечения скрытоколейного элемента может быть задана в виде трапеции, что показано на рисунке 12. На этом рисунке приведены две конструкции, направленные на уменьшение глубины поверхностной колеи (рисунок 12, а) и глубинной колеи (рисунок 12, б).

Конструкция, представленная на рисунке 12,б разработана нами давно[20], но в первоначальном варианте ширина скрытоколейного поверху составляла 90 см, а ширина центральной части понизу 30 см. Выполненные исследования по измерению ширин деформированных поверхностей земляного полотна потребовали увеличения ширин скрытоколейных элементов на земляном полотне. Конструкция, показанная на рисунке 1,а, является модификацией конструктивного решения Н.А. Фидловского, она приведена впервые.

[20] Александров А.С. Скрытоколейные дорожные одежды и особенности их проектирования //«Совершенствование организации и технологии ремонта и содержания автомобильных дорог» Сб. науч. трудов СибАДИ, 2001, С. 115–123.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Спецификой наших предложений является то, что в центральной части полосы наката, в которой глубина колеи равнопрочной по ширине дорожной одежды имеет максимальную глубину, скрытоколейный элемент имеет наибольшую толщину. В этих сечениях толщина элемента рассчитывается при величине коэффициента распределения проходов шин k_{mi}=0,8. В краевых частях скрытоколейных элементов расчет их толщины выполняется при величине коэффициента – k_{mi}=0,5. Для проверки достаточности толщины дорожной одежды в межколейном пространстве значение коэффициента – k_{mi}=0,2. Здесь отметим принципиальное отличие нашего предложения от конструкции Н.А. Фидловского. Идея Н.А. Фидловского направлена на усиление зернистого основания в пределах полос наката. Эта идея основана на том, что щебеночное основание дорожной одежды, рассчитанной по всем правилам нормативного метода, усиливается по методу пропитки по полосам наката. В данном случае происходит некоторое увеличение материалоемкости дорожной конструкции за счет пропитки битумом, которого при нормативном расчете на прочность не требуется. Наше предложение состоит в том, что дорожная одежда со скрытоколейными элементами рассчитывается при трех различных числах суммарных приложений нагрузки. Эти суммарные числа приложения расчетных нагрузок составляют: для межколейного пространства 20% от числа расчетных нагрузок по нормативной методике, для центральных и краевых частей полос наката соответственно 80% и 50%. В этом случае материалоемкость конструкции уменьшается, а за счет выравнивая величин деформаций поверхностей слоев по их ширине глубина колеи уменьшается. Безусловно, что при таком расчете все условия прочности и морозостойкости, регламентируемые нормативным документом, должны удовлетворяться.

Усиление слоев основания из зернистых материалов (см. рисунок 12,а) направлено на предотвращение деформаций сдвига в этом конструктивном элементе. Такое усиление может быть применено при деформировании поверхности покрытия, показанном на рисунке 3,а,б. Эта же конструкция может быть применена для уменьшения материалоемкости дорожных одежд с многослойным толстым асфальтобетонным покрытием, накапливающим деформации в верхних асфальтобетонных слоях (см. рисунок 3,в,г). В этом случае скрытоколейный элемент можно выполнить из асфальтобетонной смеси, получив после его перекрытия одним или двумя слоями асфальтобетона с одинаковой толщиной по ширине, большую суммарную толщину асфальтовых слоев только в пределах полосы наката, а в межколейном пространстве толщина таких слоев будет соответствовать облегченному или переходному типу дорожной одежды. В данных конструкциях ширина скрытоколейного элемента поверху принимается 90 см, то есть она равна ширине полосы наката в наиболее деформируемой части. Ширина особенно толстой части элемента понизу составляет 30 см, то есть она равна ширине полосы наката с наибольшим числом повторных нагрузок.

Скрытоколейные элементы в земляном полотне имеют ширину поверху 1,5 м, а ширина наиболее толстой части элемента понизу составляет 60 см. В этом случае учитывается распределяющая способность дорожной одежды, то есть ее способность перераспределять нагрузку на площадь, возрастающую по глубине. Грунт земляного полотна, расположенный между скрытоколейными элементами испытывает благоприятное напряженно-деформированное состояние, близкое к компрессионному сжатию. Такое состояние возникает в результате близкого расположения элементов друг от друга на расстоянии 30 см (см. рисунок 12,б). В результате этого грунт между скрытоколейными элементами работает в условиях существенного ограничения боковых деформаций, поэтому увеличение ширины скрытоколейных элементов и ее фактическая увязка с распределяющей способностью дорожной одежды нецелесообразны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части статьи выявлены причины возникновения колей на асфальтобетонных покрытиях нежестких дорожных одежд. При этом показано, что за исключением участков торможения, наибольший вклад в глубину колеи вносят деформации слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна. В местах кратковременных стоянок автобусов глубина колей, обусловленных деформированием слоев дорожной одежды и земляного полотна, существенно выше глубин колей на участке с обычным режимом движения. Следовательно, актуальность работ, направленных на разработку конструктивных мероприятий борьбы с глубинной колеей нами доказана.

Поэтому в заключение ограничимся достоинствами и недостатками предложенных нами

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

конструкций, обозначив круг задач для дальнейших исследований.

Обе предлагаемые конструкции обладают двумя преимуществами, они уменьшают материалоемкость дорожной одежды и повышают однородность деформирования дорожной одежды по ширине полос движения, тем самым способствуя уменьшению глубины колеи.

В результате близкого расположения скрытоколейных элементов друг от друга грунт земляного полотна между ними испытывает компрессионное сжатие, при котором девиатор напряжений имеет наименьшее значение по сравнению с другими напряженными состояниями земляного полотна, обусловленными трехосным сжатием, возникающим как от подвижной нагрузки, так и от собственного веса дорожной одежды. Это способствует существенному снижению деформаций в грунте.

В качестве недостатка отметим повышенную трудоемкость устройства элемента дорожной одежды со скрытоколейными элементами, но они могут устраиваться с применением средств механизации. Возможность механизации работ по устройству скрытоколейных элементов делает эти конструкции реальными в обозримой перспективе, поэтому необходимо поставить задачи, решение которых позволит внедрять скрытоколейные дорожные конструкции в строительстве.

Для успешного внедрения скрытоколейных дорожных одежд необходимо:

– разработать новую или обоснованно выбрать известную методику расчета глубины колеи, которая необходима для проверки критерия колееобразования при расчете толщин скрытоколейных элементов и толщины дорожной одежды;

– установить значения коэффициентов приведения транспортных нагрузок к расчетной нагрузке для всех типов транспортных средств. Это позволит более точно определять суммарный коэффициент приведения $S_{тс}$ в формуле , а значит, повысятся достоверность вычисления суммарного числа приложения расчетных нагрузок и надежность расчета скрытоколейных дорожных одежд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новизенцев В.В., Оськин Д.В. Скорость, дорожные условия и безопасность движения // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 3. С. 7–10.

2. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Критерии проектирования шероховатых асфальтобетонных покрытий из условия обеспечения безопасности движения // Известия вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 66–73.

3. Кириллов А.М. Учет скорости движения транспортных средств в расчетах нежестких дорожных одежд // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. №8 (119). С. 959–972.

4. Berthelot C., Crockford B., Lytton R. Comparison of alternative test methods for predicting asphalt concrete rut performance // Canadian Technical Asphalt Association Proceedings. Canada. 1999. Vol. XLVL. P. 405–434.

5. Zheng, J.; Huang, T. Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture // J. Traffi Transp. Eng. 2015. No 2. P. 93–106.

6. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. 189 p.

7. Александров А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки / Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 22–34.

8. Галдина В.Д. Серобитумные вяжущие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2011. 124 с.

9. Прокопец В.С., Т.Л. Иванова. Модификация дорожного асфальтобетона резиновыми порошками механоактивационного способа получения. Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. 116 с.

10. 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.

11. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Влияние удобоукладываемости асфальтобетонной смеси на энергоемкость процесса уплотнения // Строительные и дорожные машины. 2002. № 1. С. 14–16.

12. Завьялов М.А. Закономерности остывания асфальтобетонного слоя и их связь с продолжительностью процесса уплотнения // Механизация строительства. 2004. №2. С. 17–18.

13. Завьялов М.А. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 283 с.

14. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 45–57.

15. Матуа В.П., Панасюк Л.Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. Ростов на/Д: РГСУ. 2001. 372 с.

16. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges. 2016. Vol.15. No 4. P. 271–284.

17. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand // Acta Geophysica. 2014. Vol. 62. No 5. P. 1127–1145.

18. Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T.Strain accumulation in sand due to drained cyclic

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. Vol. 30. No 8. P. 736–745.

19. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. 2017. Analysis and modeling of process of residual deformations accumulation in soils and granular materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017) 012004.

20. Sweere G.T.H. Unbound granular bases for roads // PhD Thesis. Netherlands. Delft University of Technology. 1990. 127 p.

21. Wolff H., Visser, A.T., Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design // Transportation Engineering. 1994. Vol. 105. P. 259–272.

22. Lekarp F., A. Dawson. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials // Construction and building materials. 1998. Vol. 12. No1. P. 9–18.

23. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Ignatov V.F. Kalinin A.L. 2018. The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear // MATEC Web of Conferences. Vol. 239. 05019.

24. Su. K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements // First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. China, Beijing. 2008. P. 486–491.

25. Sousa J.B., Craus J., Monismith C. L. Summary report on permanent deformation on asphalt concrete // SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington D.C., 1994. P. 40–60.

26. Eisenmann J., Hilmer A. Influence of wheel load and inflatio pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations // Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements. 1987. P. 392–403.

27. Brunette B.E., Lundy J.R. Use and Effects of Studded Tires on Oregon Pavements // Transportation Research Record 1536, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996. P. 64–72.

28. Odermatt, N., Janoo, V., Magnusson, R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator // Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nevada. 1999.

29. Myers L.A. Drakos C., Roque R. The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance // Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements. Denmark, Copenhagen. 2002.

30. Steven B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements // PhD Thesis. New Zealand. University of Canterbury. 2005. 291 p.

31. Zornberg J.G., Gupta R. Geosynthetics in pavements: North American contributions Geosynthetics in pavements: North American contributions // 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010. P. 379–398.

32. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC. ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October, 2008.

33. Erlingsson S., Ingason Th. Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator // 2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing. University of Minnesota. 2004. 19 p.

34. Harvey, J.T. at all. Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004, Report No: UCPRC-SR-2006-02, UCPRC, Davis, Calif., 2007. 96 p.

35. Khazanovich, L., Yut, I., Tompkins, D. The Second Generation of Minnesota Accelerated Loading Facility – Minne-ALF-2. // Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colo., Aug. 14–18, 2005.

36. Monismith, C. at all. Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program, // Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004.

37. Stokoe, K.H. at all. Super-Accelerated Testing of a Flexible Pavement with the Stationary Dynamic Deflectometer (SDD) // Transportation Research Record 1716, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, P. 98–107.

38. White Th.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements // National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report No 468. Washington, D.C., 2002. 151 p.

39. Dawson A., Kolisoja P. Permanent deformation // Report on task 2.1. University OF Nottingham and Tampere University of Technology. 2007. 47 p.

40. Parker F., Brown E.R. A Study of Rutting of Alabama Asphalt Pavements. // Alabama Department of Transportation, final report for Project 2019-09, Bureau of Research and Development, Montgomery, Alabama. November 1993.

41. Sargand S.M., Young B.A., Khoury I.S., Wasniak D L., Goldsberry B.M. Final Report on Forensic Study for Section 390101 of Ohio SHRP US 23 Test Pavement // Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration. Columbus, Ohio. February 1998.

42. Chen D.-H., Bilyeu J., Murphy M., Walker D. Comparison of Rut-Depth Measurements // draft of a paper submitted to the Transportation Research Board for consideration for presentation and publication at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C., by the Texas Department of Transportation, Austin, Texas. July 2000.

43. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд. / Б.С. Радовский // Дорожная техника. 2011. № 11. С. 132–144.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

44. 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. 2014. № 7 (59). С. 4–17.

45. Александрова Н.П., Чусов В.В. Особенности расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу с учетом накапливания повреждений // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 42–50.

46. Dawley C.B., Hogewiede B.L., Anderson K.O. Mitigation of Instability Rutting of Asphalt Concrete Pavements in Lethbridge, Alberta, Canada. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 59, Association of Paving Technologists, St. Paul, Minnesota. 1990. P. 481–508.

47. Lenngren C.A. Some Approaches in Treating Automatically Collected Data on Rutting. // Transportation Research Record 1196, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988.

48. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements. Evaluation of test methods and prediction models // Samaris D28. 2006. Vol. 1. 144 p.

REFERENCES

1. Novizencev V.V., Os'kin D.V. Skorost', dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya [Speed, road conditions and traffi safety] // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli, 2007; 3: 7–10 (in Russian).

2. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Kriterii proektirovaniya sherohovatyh asfal'tobetonnyh pokrytij iz usloviya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya [Criteria for the design of rough asphalt pavements from the conditions of ensuring traffi safety] // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo, 2009; 2: 66–73 (in Russian).

3. Kirillov A.M. Uchet skorosti dvizheniya transportnyh sredstv v raschetah nezhestkih dorozhnyh odezhd [Accounting for vehicle speed in non-rigid pavement calculations] // Vestnik MGSU, 2018; T.13; 8 (119): 959–972 (in Russian).

4. Berthelot C., Crockford B., Lytton R. Comparison of alternative test methods for predicting asphalt concrete rut performance // Canadian Technical Asphalt Association Proceedings. Canada, 1999, Vol. XLVL: 405–434.

5. Zheng, J.; Huang, T. Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture // J. Traffi Transp. Eng. 2015, 2: 93–106.

6. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany, 2003: 189 p.

7. Aleksandrov A.S. Plasticheskoe deformirovanie granodioritovogo shchebnya i peschano-gravijnoj smesi pri vozdejstvii trekhosnoj ciklicheskoj nagruzki [Plastic deformation of granodiorite crushed stone and sand-gravel mixture under the action of a triaxial cyclic load] / Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2013, 4: 22–34 (in Russian).

8. Galdina V.D. Serobitumnye vyazhushchie [Gray-bituminous binders]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2011:124 p. (in Russian).

9. Prokopec V.S., T.L. Ivanova. Modifikaciy dorozhnogo asfal'tobetona rezinovymi poroshkami mekhanoaktivacionnogo sposoba polucheniya [Modification of road asphalt concrete with rubber powders of the mechanical activation method for producing]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2012: 116 p. (in Russian).

10. Lytkin A.A. Vliyanie povtornogo uplotneniya i transportnyh nagruzok na harakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyah dorozhnyh odezhd [The effect of re-compaction and transport loads on the nature of hardening of belitic sludge in the layers of pavements] // Vestnik SibADI, 2017, 3 (55): 125–132 (in Russian).

11. Zav'yalov M.A., Zav'yalov A.M. Vliyanie udoboukladyvaemosti asfal'tobetonnoj smesi na energoemkost' processa uplotneniya [Effect of workability of asphalt mix on the energy intensity of the compaction process] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2002, 1: 14–16 (in Russian).

12. Zav'yalov M.A. Zakonomernosti ostyvaniya asfal'tobetonnogo sloya i ih svyaz' s prodolzhitel'nost'yu processa uplotneniya [Patterns of cooling of the asphalt concrete layer and their relations with the duration of the compaction process] // Mekhanizaciya stroitel'stva, 2004, 2: 17–18 (in Russian).

13. Zav'yalov M.A. Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo cikla dorozhnogo asfal'tobetonnogo pokrytiya [Thermodynamic theory of the life cycle of asphalt pavement] Omsk: Izd-vo SibADI, 2007: 283 p. (in Russian).

14. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Raschet dorozhnyh odezhd po kriteriyam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnyh pokrytij [Calculation of pavement according to evenness criteria. Part 1. Justification of the evenness standards of asphalt concrete pavements] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2015, 5 (57): 45–57 (in Russian).

15. Matua V.P., Panasyuk L.N. Prognozirovanie i uchet nakopleniya ostatochnyh deformacij v dorozhnyh konstrukciyah [Prediction and accounting for the accumulation of residual deformations in road structures]. Rostov-na-Donu: RGSU, 2001: 372 p. (in Russian).

16. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges, 2016, Vol.15, 4: 271–284.

17. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand // Acta Geophysica, 2014, Vol. 62, 5: 1127-1145.

18. Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T.Strain accumulation in sand due to drained cyclic loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, Vol. 30, 8: 736–745.

19. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. (2017) Analysis and modeling of process of

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

residual deformations accumulation in soils and granular materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017): 012004.

20. Sweere G.T.H. Unbound granular bases for roads // PhD Thesis. Netherlands. Delft University of Technology, 1990: 127 p.

21. Wolff H., Visser, A.T., Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design // Transportation Engineering, 1994, 105: 259–272.

22. Lekarp F., A. Dawson. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials // Construction and building materials, 1998, Vol. 12, 1: 9–18.

23. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Ignatov V.F. Kalinin A.L. (2018) The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear // MATEC Web of Conferences. Vol. 239: 05019.

24. Su. K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements // First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. China, Beijing, 2008: 486–491.

25. Sousa J.B., Craus J., Monismith C. L. Summary report on permanent deformation on asphalt concrete // SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington D.C., 1994: 40–60.

26. Eisenmann J., Hilmer A. Influence of wheel load and inflatio pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations // Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements, 1987: 392–403.

27. Brunette B.E., Lundy J.R. Use and Effects of Studded Tires on Oregon Pavements // Transportation Research Record 1536, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996: 64–72.

28. Odermatt, N., Janoo, V., Magnusson, R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator // Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nevada, 1999.

29. Myers L.A. Drakos C., Roque R. The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance // Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements. Denmark, Copenhagen, 2002.

30. Steven B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements // PhD Thesis. New Zealand. University of Canterbury, 2005: 291 p.

31. Zornberg J.G., Gupta R. Geosynthetics in pavements: NorthAmerican contributions Geosynthetics in pavements: North American contributions // 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010: 379–398.

32. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC. ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October, 2008.

33. Erlingsson S., Ingason Th. Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator // 2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing. University of Minnesota, 2004: 19 p.

34. Harvey, J.T. at all. Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004, Report No: UCPRC-SR-2006-02, UCPRC, Davis, Calif., 2007: 96 p.

35. Khazanovich, L., Yut, I., Tompkins, D. The Second Generation of Minnesota Accelerated Loading Facility – Minne-ALF-2. // Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colo., Aug. 14–18, 2005.

36. Monismith, C. at all. Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program, // Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004.

37. Stokoe, K.H. at all. Super-Accelerated Testing of a Flexible Pavement with the Stationary Dynamic Deflectometer (SDD) // Transportation Research Record 1716, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000: 98–107.

38. White Th.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements // National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report No 468. Washington, D.C., 2002: 151 p.

39. Dawson A., Kolisoja P. Permanent deformation // Report on task 2.1. University OF Nottingham and Tampere University of Technology, 2007: 47 p.

40. Parker F., Brown E.R. A Study of Rutting of Alabama Asphalt Pavements. // Alabama Department of Transportation, final report for Project 2019-09, Bureau of Research and Development, Montgomery, Alabama. November, 1993.

41. Sargand S.M., Young B.A., Khoury I.S., Wasniak D L., Goldsberry B.M. Final Report on Forensic Study for Section 390101 of Ohio SHRP US 23 Test Pavement // Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration. Columbus, Ohio. February, 1998.

42. Chen D.-H., Bilyeu J., Murphy M., Walker D. Comparison of Rut-Depth Measurements // draft of a paper submitted to the Transportation Research Board for consideration for presentation and publication at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C., by the Texas Department of Transportation, Austin, Texas. July, 2000.

43. Radovskij B.S. Koncepciya vechnyh dorozhnyh odezhd. / B.S. Radovskij // Dorozhnaya tekhnika, 2011, 11: 132–144 (in Russian).

44. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Sovershenstvovanie rascheta dorozhnyh konstrukcij

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

po soprotivleniyu sdvigu. Chast' 1. Uchet deformacij v uslovii plastichnosti Kulona — Mora // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2014, 7 (59): 4–17 (in Russian).

45. Aleksandrova N.P., Chusov V.V. Osobennosti rascheta asfal'tobetonnyh pokrytij po soprotivleniyu sdvigu s uchetom nakaplivaniya povrezhdenij // Vestnik SibADI, 2016, 3 (49): 42–50 (in Russian).

46. Dawley C.B., Hogewiede B.L., Anderson K.O. Mitigation of Instability Rutting of Asphalt Concrete Pavements in Lethbridge, Alberta, Canada // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 59. Association of Paving Technologists, St. Paul, Minnesota, 1990: 481–508.

47. Lenngren C.A. Some Approaches in Treating Automatically Collected Data on Rutting. // Transportation Research Record 1196, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988.

48. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements. Evaluation of test methods and prediction models // Samaris D28, 2006, 1: 144 p.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. – Разработка скрытоколейных конструкций дорожных одежд с усиливающими элементами переменной толщины, выполнение экспериментальных исследований распределения проходов шин по ширине полос движения проезжей части автомобильных дорог, обработка данных эксперимента. Сбор и анализ информации об экспериментальном изучении остаточных, накапливаемых слоями дорожных одежд и грунтами земляного полотна. Написание введения и заключения.

Семенова Т.В. – Учет и регистрация проходов шин транспортных средств в пределах сечений, выделенных на полосах движения автомобильных дорог, необходимых при выполнении экспериментальных исследований по изучению распределения проходов шин по ширине полос движения проезжей части. Проверка статьи.

Калинин А.Л. – Вычисление остаточных деформаций, накапливаемых конструктивными слоями дорожной одежды и грунтом земляного полотна при обработке экспериментальных данных. Определение вклада слоев дорожной и грунтов земляного полотна в глубину колеи, образующуюся на поверхности покрытия дорожной одежды.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anatoliy S. Aleksandrov – development of hidden rut structures of road pavements with reinforcing elements of variable thickness; experimental studies of the distribution of tire passes over the width of the lanes of the roadway; processing of experimental data; collection and analysis of information on the experimental study of residual accumulated layers of pavements and soils of the highway subgrade; formulation of further research; writing the introduction and conclusion.

Tatiana V. Semenova – accounting and registration of vehicle tire passes within the sections allocated to the coasting strip and necessary for the implementation of experimental studies to study the distribution of traffic way over the width of the roadway traffic lanes; checking the article.

Aleksandr L. Kalinin – calculation of residual deformations accumulated by structural layers of road pavement and soil of the highway subgrade during the processing of experimental data; determination of the contribution of layers of road pavements and soil of the highway subgrade to the depth of the rut formed on the surface of road pavements.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0003-2009-5361 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru),

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0002-1921-8531 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: stv8@yandex.ru),

Калинин Александр Львович – ст. преподаватель, кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0003-0291-2022 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: a1exsandr55ne@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0003-2009-5361 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: aleksandrov00@mail.ru).

Tatiana V. Semenova – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0002-1921-8531 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: stv8@yandex.ru).

Aleksandr L. Kalinin –Ssenior Lecturer, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID ORCID 0000-0003-0291-2022 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: a1exsandr55ne@mail.ru).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 625.7/8
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОПЛИВНОГО ШЛАКА ТЭЦ

А.А. Лунёв
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В мировой практике последних десятилетий стало нормой использование отходов теплоэнергетики в строительной отрасли. В основном золошлаки применяют при строительстве автомобильных дорог как материал для отсыпки земляного полотна или в виде укрепленного вяжущим материала, в промышленно-гражданском строительстве как материал для выполнения планировочных работ, при засыпке неудобий и карьеров. Однако потенциал его возможного применения намного шире. Крупнозернистые шлаковые отложения, формирующиеся в зоне шлакового размыва, имеют больший потенциал применения, чем прочие ЗШС, однако менее изучены как отечественными, так и зарубежными исследователями. В статье рассматривается вопрос использования крупнозернистых золошлаковых смесей (ЗШС), образованных на электростанциях с котлами, подразумевающими жидкое шлакоудаление, для сооружения оснований дорожных одежд с позиции её механических свойств.*

Материалы и методы. *В рамках исследования изучены образцы шлакового щебня с Новосибирской ТЭЦ- 2, работающей на угле Кузнецкого угольного бассейна (жидкое шлакоудаление), и Новосибирской ТЭЦ-3, работающей на угле Канско-Ачинского угольного бассейна (жидкое шлакоудаление). Определены потери при дробимости отдельных фракций исследованных материалов в сухом и насыщенном водой состоянии. Проведен анализ графиков разрушения для определения модуля общей деформации шлакового щебня.*

Результаты. *Найдено различие в механической прочности проб материала разного генезиса. Определены значения дробимости исследуемых материалов. Оценены полученные при проведении испытаний графики, на основе которых вычислены характеристики деформируемости этого материала (при разной крупности).*

Обсуждение и заключение. *Определены возможные направления использования изученных материалов при строительстве автомобильных дорог.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *строительство, автомобильные дороги, дорожная одежда, золошлаковые смеси, шлаковый щебень, дробимость, модуль деформации.*

Поступила 20.08.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. *Исследования выполнены за счет средств фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (ГРАНТ «УМНИК» № 12396ГУ/2017).*

Для цитирования: Лунёв А.А. Исследование механической прочности топливного шлака ТЭЦ. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 746–757. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757

© Лунёв А.А.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757

MECHANICAL STRENGHT'S RESEARCH OF THE THERMAL POWER STATION'S SLAG

Aleksander A. Lunev
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The use of the thermal power station's (TPS) waste in the construction industry becomes the norm in world practice of recent decades. Basically, the researches use ash and slag in the construction of automobile roads as a material for filling the subgrade or in the form of a cement-bound material in industrial and civil construction as a material for planning work, when filling inconveniences and quarries. However, the potential of the ash and slag's usage is much wider.*

Coarse-grained slag deposits that form in the zone of slag erosion have a greater potential for application than other ash and slag mixtures, however, these mixtures have been less studied by both domestic and foreign researchers. The paper discusses the use of the boiler slag formed at power plants with boilers involving liquid slag removal for the construction of road pavement bases with the position of its mechanical properties.
Materials and methods. *The author studied samples of boiler slag from Novosibirsk TPS-2, operating (Kuznetsk coal basin) and Novosibirsk TPS-3 (Kansko-Achinsk coal basin). Moreover, the author determined the crushing losses of individual fractions of the investigated materials in a dry and water-saturated state. The author determined the modulus of deformation of boiler slag.*

Results. *The researcher found the difference in mechanical strength of the different genesis material. The crushing values of the investigated materials are determined.The author estimated the graphs obtained during testing and calculated the deformability characteristics of the material.*

Discussion and conclusions. *The author determines possible directions of the studied materials' usage in the road construction.*

KEYWORDS: *building, road construction, road base, ash and slag mixtures, boiler slag, crushability, modulus of elasticity.*

Submitted 20.08.2019, revised 17.12.2019.
The author has read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS. *The researches were carried out at the expense of the Fund for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (grant "UMNIK", No. 12396GU / 2017).*

For citation: Lunev Aleksander A. Mechanical strenght's research of the thermal power station's slag. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 746–757 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757

© Lunev A.A.

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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что в мире повсеместно внедряются альтернативные источники энергии, одним из основных мировых источников является ископаемый уголь[1]. По прогнозам специалистов, в ближайшие десятилетия уголь останется основным энергетическим ресурсом.

Однако при сжигании угля для производства тепло- и электроэнергии образуется от 10 до 50% отходов теплогенерации – золошлаковых отходов. Ежегодно только в России образуется около 23–24 млн тонн отходов тепловых электростанций, работающих на ископаемых углях. По оценкам специалистов, в РФ утилизируется только 8–10% (в некоторых странах до 100%) от ежегодного выхода ЗШО, большая же часть размещается на специализированных гидротехнических сооружениях – золоотвалах [1].

Помимо накопления огромного количества отходов, захоронение ЗШО имеет ряд серьезных недостатков: поверхность отвала в летний период периодически подвергается пылеуносу, в силу чего загрязняются окрестные территории и жилые дома; золоотвалы занимают огромные площади потенциально пригодных территорий; существующая технология хранения ЗШО вызывает высокий риск техногенных аварий (обрушения дамб), приводящих к катастрофическим последствиям [2, 3, 4] (несмотря на экологическую безопасность этого материала, подтвержденную многими исследованиями) [5, 6].

По этим причинам во многих странах идет активное внедрение технологий утилизации золошлаковых смесей в областях от мелиорации сельхозугодий до извлечения редкоземельных элементов [7, 8, 9, 10, 11]. Огромный пласт исследований посвящен использованию золошлаков в строительстве, причем наибольший интерес вызывает именно отрасль дорожного строительства [12, 13, 14, 15].

Наиболее активная работа в этой сфере шла в СССР и США в 70–80-е годы прошлого столетия. В США в период с 1971 по 1993 год построено 23 объекта транспортной инфраструктуры в 13 штатах. Однако фундаментальных и системных исследований свойств этих материалов практически не проводилось в силу эмпирического уклона, методов проектирования дорожных сооружений в штатах[2].

На сегодняшний день наиболее широко золошлаки используют в Индии. Строятся уникальные объекты, используются миллионы тонн материалов каждый год. Индийские ученые выполняют множество исследований по определению параметров механических свойств ЗШС, изучению нестандартных конструкций и грунтовых комбинаций на основе ЗШС [16, 17, 18, 19, 20]. Несмотря на огромный ряд выполненных исследований, до сих пор не были проанализированы механические свойства крупных шлаковых частиц.

Крупные шлаковые частицы обладают более высокими коэффициентами фильтрации, пониженным значением или отсутствием морозного пучения, а также более стабильными механическими характеристиками при увлажнении (за счет отсутствия растворимых веществ). Рассмотрение крупнозернистых смесей отдельно от прочих ЗШС вызвано еще и тем, что при транспортировке золошлаковых отходов на золоотвал происходит их сегрегация. Более плотные и крупные частицы осаждаются вблизи выхода пульпы, а мелкие уносятся русловыми потоками [21].

Подобное расслоение наиболее характерно для отвалов электростанций с котлами, оборудованными системами жидкого шлакоудаления. Гранулированный шлак, образованный в таких системах, существенно крупнее, чем пористый шлак, образованный в системах с сухим золошлакоудалением, поэтому зона шлакового размыва сложена преимущественно шлаковым щебнем и песком (содержание шлакового щебня и песка в исследованных смесях достигало 95% по массе).

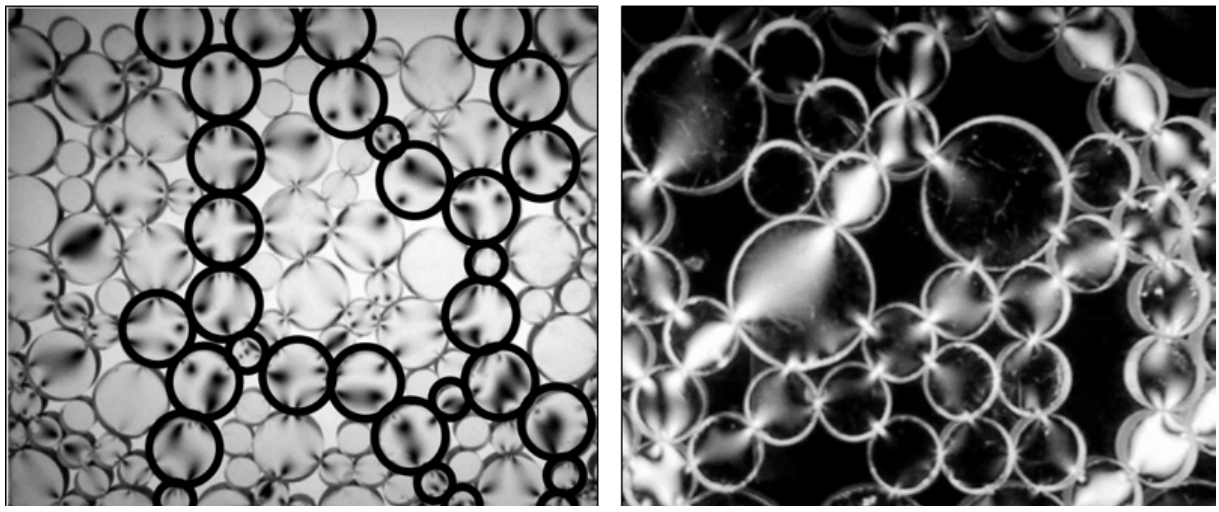
Кроме того, механизм распределения напряжений в крупнозернистых и мелкозернистых системах существенно отличается. Если мелкозернистые смеси можно рассматривать как квазисплошную среду с равномерным распределением контактных напряжений, то в крупнозернистых смесях передача нагрузок существенно отличается.

Проведенные Сантамарина [22], Беринг ером [23], Кларком [24], Танагата [25] исследования показывают, что распределение напряжений кардинальным образом зависит от крупности частиц.

[1] Key World Energy Statistics: International energy agency. [Электронный ресурс]. 2017. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf (дата обращения: 01.08.2019).

[2] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. [Электронный ресурс] URL: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm (дата обращения: 28.06.2019).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а *б*

Рисунок 1 – Цепочки напряжений в нагруженных фотоупругих дисках, проявленные при просвечивании в поляризованном свете: а – в массиве из мелких частиц; б – в массиве из более крупных, разноразмерных частиц

Figure 1 – Tension chains in loaded photoelastic disks during transmission in polarized light: а – in an array of small particles; б – in an array of larger, different-sized particles

Крупнозернистые смеси имеют весьма малое число точек контактов, а также более активно создают арочные конструкции. При этом видно, что часть элементов воспринимает наибольшую нагрузку, а некоторые вообще не испытывают давления (рисунок 1).

При концентрации напряжений в точке контакта происходит разрушение частицы, что вызывает перераспределение частиц, сопряженное с осадкой конструкции. По этой причине, при изучении пригодности крупнозернистых ЗШС, на первый план выходит не изучение из прочностных и деформационных свойств, а оценка сопротивляемости к разрушению под действием механических нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Сибирском Федеральном округе наиболее распространены золошлаковые смеси от сжигания Экибастузских, Кузнецких и Канско-Ачинских углей. Котлами с системой жидкого шлакоудаления в основном оборудованы ТЭС, работающие на Кузнецких и Канско-Ачинских углях. Поэтому для исследования отбирались образцы материала из зоны шлакового размыва отвалов двух электростанций:

– Новосибирской ТЭЦ-2, работающей на угле Кузнецкого угольного бассейна;

– Новосибирской ТЭЦ-3, работающей на угле Канско-Ачинского угольного бассейна (рисунок 2).

а *б*

Рисунок 2 – Места отбора проб золошлаковых материалов: а – золоотвал Новосибирской ТЭЦ-2; б – золоотвал Новосибирской ТЭЦ-3

Figure 2 - Sampling sites for ash and slag materials а – ash dump of Novosibirsk TPS-2; б –ash dump of Novosibirsk TPS-3

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Исследования, проведенные [26, 27], указывают на зависимость между химическим составом (генезисом) и механическими свойствами мелкозернистых золошлаковых смесей, что вероятно оказывает аналогичное влияние и на свойства крупных частиц. Поэтому средний химический состав этих смесей приведен в таблице 1.

Оценка гранулометрического состава образцов, отобранных на этих отвалах, показала, что до 65% материала являются шлаковым щебнем, а до 50% относятся к шлаковым пескам.

Испытания на дробимость выполнялись согласно ГОСТ 8269.0–97 путем определения степени разрушения зерен при сжатии (раздавливании) в цилиндре. Перед испытанием пробы золошлаковых материалов подготавливались в лаборатории.

Отобранные пробы ЗШС высушивали до воздушно-сухого состояния, рассеивали на стандартные фракции щебня (размером 5–10, 10–20, 20–40 мм) путем просеивания материала на соответствующих ситах. Аналитические пробы для испытания в насыщенном состоянии выдерживали в воде в течение 2 ч, а для испытаний в сухом состоянии высушивались до постоянной массы.

В связи с ограниченным количеством материала для исследований, определение дробимости проводилось для фракций 5–10 и 10–20 в цилиндре диаметром 75 мм, а для фракции 20–40 в цилиндре диаметром 150 мм. Испытания в цилиндре диаметром 75 мм проводились в автоматизированном прессе ИР 5081-5, а в цилиндре диаметром 150 мм в гидравлическом прессе. Фотография в процессе испытаний представлена на рисунке 3, а.

В ходе исследования скорость нагружения составляла 1,5 кН в секунду. Максимальная нагрузка для испытаний в цилиндре диаметром 75 мм составляла 50 кН, при испытании в цилиндре диаметром 150 мм – 200 кН.

Проведение экспериментальных исследований сопровождалось видео- и аудио записью, что позволило дифференцировать стадии эксперимента в зависимости от интенсивности дробления частиц.

После сжатия пробу высыпали из цилиндра и взвешивали, а далее отправляли на контрольное сито для просева. Материал, задержанный на контрольном сите, также взвешивался. Фотография в процессе испытаний представлена на рисунке 3, б.

Для каждой фракции исследуемого материала было проведено три испытания в сухом состоянии и два в насыщенном водой состоянии. По результатам испытаний определялась дробимость смеси фракций, представленных в пробах, отобранных с золоотвала.

При подготовке определялось и количество зерен лещадной (игловидной) формы.

Из лабораторных проб отбирали аналитические пробы массой 250 г для фракции 5–10 мм, 1000 г для фракции 10–20 мм и 5000 г для фракции 20–40 мм. Из взвешенной пробы отбирались зерна, толщина которых меньше длины в три раза и более.

В связи с использованием при определении дробимости оборудования, оснащенного датчиками перемещений, по построенным в ходе опыта графикам были определены значения модулей деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В опытах исследовались два вида шлакового щебня: образованного от сжигания Куз-

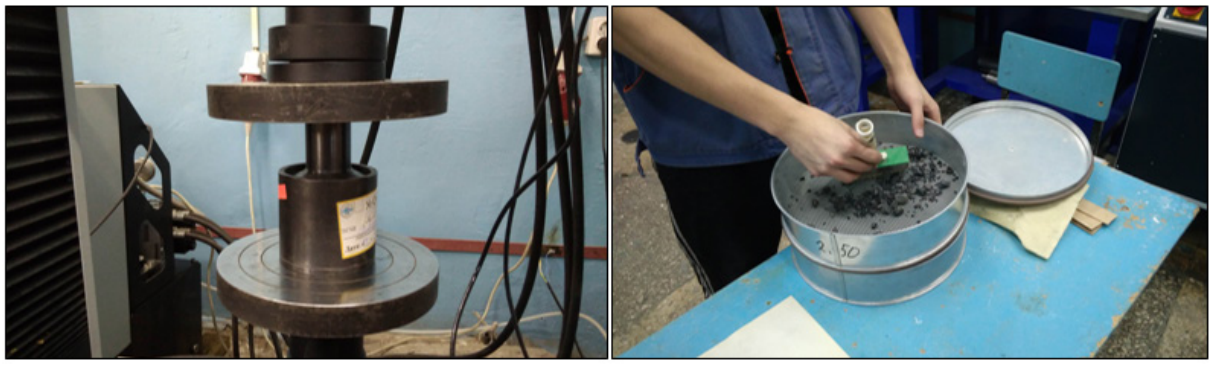
Таблица 1
Средний химический состав исследованных золошлаковых смесей

Table 1
Average chemical composition of the investigated ash and slag mixtures

Вид материала сжигаемого угля	Химический состав, в % по массе								
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	п.п.п.
Кузнецкий	50–64	18–30	4–15	2–10	0,5–2,5	1,3–2,4	0,5–1,3	0,3–2,2	3–22
Канско-Ачинский (Бород)	40–55	4–10	6–14	20–35	3–6	0,3–1,5	0,2–0,5	0,9–5	2

Примечание. п.п.п. – потеря массы при прокаливании (содержание горючих веществ).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а *б*

Рисунок 3 – Процесс проведения испытаний в цилиндре диаметром 75 мм:
а – шлаковый щебень, сжатый в цилиндре; б – просеивание раздавленного образца на контрольном сите

Figure 3 – Process of testing in a cylinder with a diameter of 75 mm:
a – boiler slag, compressed in the cylinder; б – sieving of the crushed sample on a control sieve

нецкого (более пористого) и Канско-Ачинского (гладкого остеклованного) угля. В отличие от мелкозернистых ЗШС внутренняя часть агрегата не имеет внутренних пор, поэтому разница в структуре сводится в основном к форме поверхности. Внешний вид исследуемого материала представлен на рисунке 4.

В ходе исследований были проанализированы по три пробы каждой фракции материала в сухом состоянии и по три в насыщенном водой, для каждого типа материала. Результаты исследований приведены на графике рисунка 5.

Из графика видно, что дробимость частиц шлакового щебня растет с ростом крупности агрегатов независимо от типа материала. Это вызвано, по всей видимости, тем, что при увеличении крупности зерен уменьшается число контактов, которое ведет к повышению контактных напряжений (как и в опытах *R. Beringher* и *Santamarina*), что и вызывает разрушение частиц.

Изменение влажности не оказало существенного влияния на механическую прочность образцов за исключением незначительного влияния воды в образце ЗШС фракции 5–10 мм от сжигания Канско-Ачинского угля. Предположительно это связано с тем, что для относительно мелких частиц с остеклованной поверхностью водные пленки в точках контакта сыграли роль смазки, что вызвало скольжение некоторых частиц, увеличило напряжения в плотно защемленных агрегатах и вызвало их разрушение.

а *б*

Рисунок 4 – Образцы исследуемого материала:
а – щебень от сжигания Кузнецкого угля; б – щебень от сжигания Канско-Ачинского угля

Figure 4 – Samples of the studied material:
a – crushed stone from the burning of the Kuznetsk coal; б – crushed stone from the burning of the Kansk-Achinsk coal

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

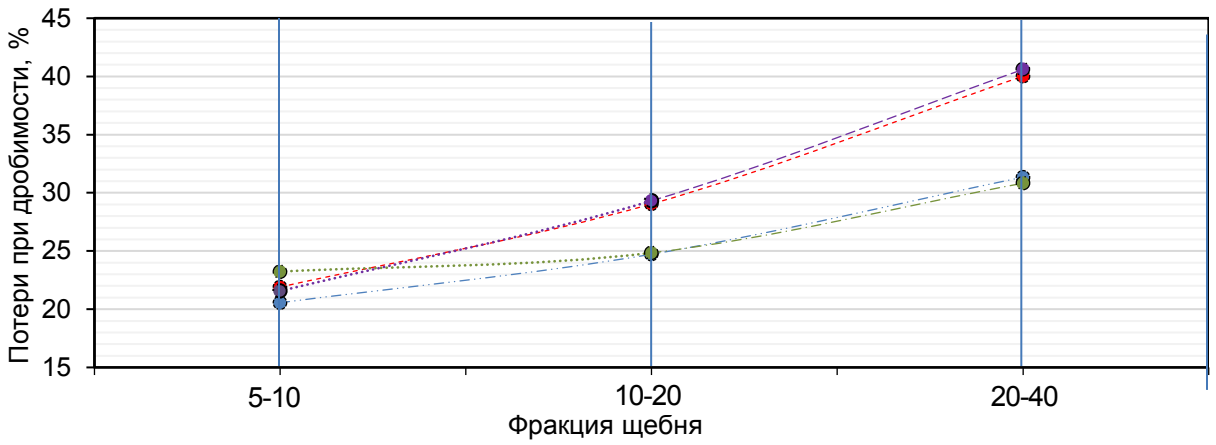


Рисунок 5 – График изменения дробимости по фракциям:
шлаковый щебень от сжигания Канско-Ачинского угля: – сухого; – насыщенного;
шлаковый щебень от сжигания Кузнецкого угля: – сухого; – насыщенного

Figure 5 – Graph of changes in fractionability:
crushed stone from burning Kansk-Achinsk coal: – dry; – saturated;
crushed stone from burning Kuznetsk coal: – dry; – saturated

На основе полученных значений и положений ГОСТ 3344–83 также была ориентировочно определена марка по дробимости исследованных образцов ЗШС. Поскольку в нормативной документации не проводится критериев для присвоения марки по прочности щебню из угольного шлака, за аналог были взяты шлаки черной металлургии (таблица 2).

Во всех исследованных пробах отсутствовало значимое количество пластинчатых или игольчатых частиц. Причина этому – механизм грануляции расплава, при котором агрегация частиц проходит в водной среде. Расплав стремится принять форму, максимально близкую сферической, но из-за высокой вязкости и интенсивного охлаждения принимает угловатую форму. За счет большей температуры плавления ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеет больше раковин.

Анализ графиков и звуковых дорожек съемки эксперимента, полученных в ходе сжатия образцов, показывает разделение процесса деформирования на три стадии: упругое деформирование (почти полное отсутствие разрушения частиц), интенсивное дробление (повышение скорости осадки штампа, измельчение по меньшей мере трех частиц каждую секунду) и затухание дробления, т.е. снижение частоты разрушений и уменьшение скорости осадки штампа несмотря на повышение уровня напряжений (рисунок 6).

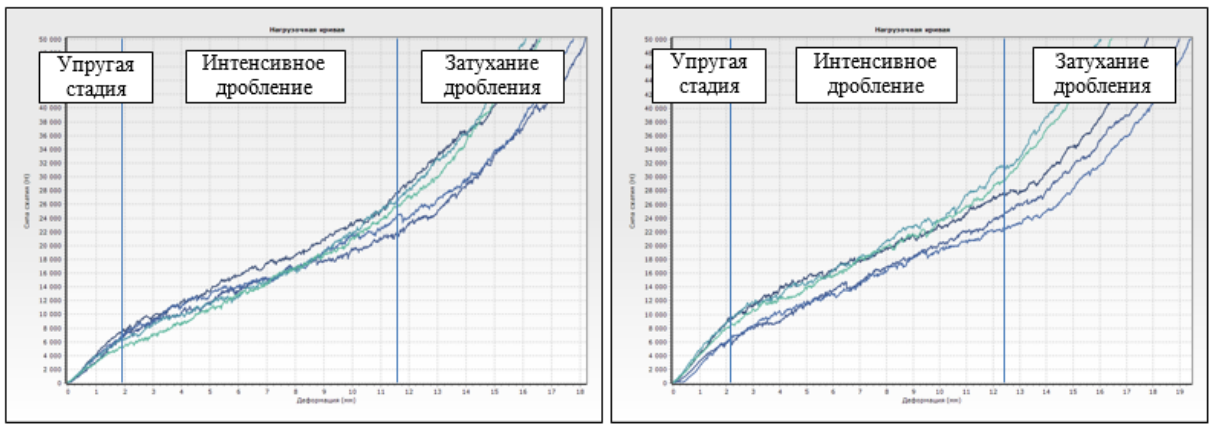
Поскольку в упругой стадии не было отмечено систематических разрушений частиц, по всей видимости, осадки штампа вызваны деформациями частиц и их переупаковкой. Эта стадия характеризовалась максимальным уровнем напряжений 450–2200 кПа (в зависимости от крупности частиц и генезиса золошлакового материала), что значительно выше, чем транспортные нагрузки на основании дорожных одежд.

Таблица 2
Результаты определения дробимости

Table 2
Results of the crushability determination

Тип угля Размер частиц, мм	Марка по прочности по ГОСТ 3344–83	
	Канско-Ачинский	Кузнецкий
5–10	1000	1000
10–20	800	800
20–40	800	600

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а *б*

Рисунок 6 – Графики испытаний образцов шлакового щебня:
а – щебень от сжигания Кузнецкого угля; б – щебень от сжигания Канско-Ачинского угля

Figure 6 – Graphs of the slag crushed stone's tests:
a – crushed stone from the burning of the Kuznetsk coal; б – crushed stone from the burning of the Kansk-Achinsk coal

Интенсивное дробление шлакового щебня связано с повышением уровня напряжений в форме до уровня 3300–7250 кПа (при этом уровне начинается переход в стадию затухания дробления). Стадии разрушения и затухания разрушений происходят при напряжениях значительно выше возникающих в основаниях дорожных конструкций, поэтому менее интересны для дальнейшего анализа.

В упругой стадии исследования не отмечалось разрушений частиц, уровень напряжений в форме прибора при испытаниях был сопоставим с напряжениями от транспортных нагрузок, а сама схема испытаний являлась неким аналогом компрессионного прибора. Поэтому с некоторыми допущениями, по графикам деформации от нагрузки, можно определить деформационные характеристики ЗШС.

С точки зрения применения этого материала в дорожных конструкциях (основания дорожной одежды, дополнительные слои основания) к таким характеристикам можно отнести модуль упругости и модуль деформации. Модуль деформации (одометрический) может быть определен непосредственно из графика. Модуль упругости будет равен ему при допущении, что все деформации в упругой стадии исследования были обратимы (отсутствие звуков разрушения может указывать на это). Приближенные модули деформации, определенные путем анализа графиков, приведены в таблице 3.

Как и в опытах других авторов [28, 29, 30, 31], отмечено влияние влажности на способность золошлакового материала деформироваться, причем, как и в работах [30, 31], влияние влажности снижает деформационные параметры.

Таблица 3
Результаты определения модулей деформации (упругой стадии)

Table 3
Determination results of the deformation modulus (elastic stage)

Тип угля Размер частиц, мм	Модуль деформации, МПа	
	Канско-Ачинский	Кузнецкий
5–10	45/37	45/33
10–20	34/22	22/11
20–40	27/14	17/9
Примечание. Значения под чертой соответствуют водонасыщенному золошлаковому материалу.		

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая дробимость крупных фракций связана с тем, что количество точек контакта в них меньше, а значит, контактные напряжения выше. Поэтому при равных нагрузках критическая длина трещин Гриффитса в крупных фракциях меньше, а поскольку размер естественных трещин в частицах имеет сопоставимый размер, разрушение идет быстрее.

Механизм развития трещин также объясняет, почему частицы ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеют меньшую прочность. Наличие больших неровностей, раковин, чем в образцах Канско-Ачинской ЗШС, требует меньшего уровня напряжений для того, чтобы размер дефекта стал больше критической величины. Этим обусловлены большие разрушения при равном уровне напряжений.

Развитие трещины идет в стеклоподобной частице ЗШС со скоростью, меньшей скорости звука, в то время как волны напряжений распространяются в частице со скоростью звука, отражаясь от существующих и новообразованных поверхностей. Поэтому помимо развития основной трещины происходит образование множественных побочных трещин, что объясняет в целом высокую дробимость материала и появление мелкодисперсных частиц в ходе испытания.

Влияние воды почти не сказалось на дробимости частиц, поскольку в составе шлакового щебня не обнаружено растворимых соединений. Повышение дробимости фракции 5–10 от сжигания Канско-Ачинского угля при увлажнении предположительно связано с тем, что для относительно мелких частиц с остеклованной поверхностью водные пленки в точках контакта сыграли роль смазки, что вызвало скольжение частиц и разрушение плотно защемленных агрегатов в процессе перестроения структуры.

Влияние химического состава частиц от сжигания разного угля также может играть роль. Менее плотные Кузнецкие ЗШС имеют более высокую дробимость, однако не ясно, играет ли решающую роль структура или химический состав ЗШС.

Во всех исследованных пробах отсутствовало значимое количество пластинчатых или игольчатых частиц. Причина – механизм грануляции расплава, при котором агрегация частиц проходит в водной среде. Расплав стремится принять форму, максимально близкую сферической, но из-за высокой вязкости и интенсивного охлаждения принимает угловатую форму. Причем за счет большей температуры плавления ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеет больше раковин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки дробимости и модуля деформации (неуплотненного) материала показывают, что шлаковый щебень, полученный от сжигания Канско-Ачинских и Кузнецких углей, может быть использован (с позиции механической прочности) в качестве:

- материала земляного полотна или вертикальной планировки;
- материала дополнительных слоев основания дорожных одежд.

Результаты определения механической прочности исследованных топливных шлаков, полученных от сжигания Канско-Ачинских и Кузнецких углей, указывают на необходимость дополнительных исследований, для установления их пригодности в качестве:

- материала основания дорожных одежд, укрепленного органически или минеральным вяжущим;
- компонента бетонных смесей.

Поскольку эти направления потенциально могут оказаться эффективным способом утилизации данных побочных продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологиий // Вестник СибАДИ. 2017; (6(58)): 119–125. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-119-125.

2. Bartov G., Deonarine A., Johnson TM., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes // Environmental Science & Technology. Washington, D.C., 2012. Vol. 47(4). Pp. 2092–2099. DOI: 10.1021/es303111p.

3. Deonarine A., Bartov G., Johnson TM., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments // Environmental Science & Technology. Washington, D.C., 2012. Vol. 47(4). Pp. 2100–2108. DOI: 10.1021/es303639d.

4. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., et.al. Article. Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River // BIOS journal. 2017. Vol. 88(2). Pp. 72-85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1.

5. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P. V., Kozik V.V. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics // IOP Conf. Series:

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 127. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024.

6. Lihach S. A., Kulesh R. N., Nikolaeva V. I., Orlova K.Y., Ilyasova A. S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 92. №. 01051. DOI: 10.1051/matecconf/20179201051.

7. Folgueras M.B. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements / M.B. Folgueras, M. Alonso, F.J. Fernández // Fuel. 2017. Vol. 192. Pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019.

8. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3. С. 17–24. DOI: 10.5862/MCE.47.2.

9. Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Сутурина Е.О., Бурдонова А.В., Головнина А.В. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 14–22.

10. Yao Z.T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi // Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 141. Pp. 105–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016.

11. Лебедев М.С., Чулкова И.Л. Исследования реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №11. С. 47–52.

12. Толстой А.Д., Ковалева И.А., Новиков К.Ю. Совершенствование состава и свойств порошковых бетонов с техногенным сырьем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №2. С. 19–24.

13. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications // Procedia Environmental Sciences. 2016. Vol. 35. Pp. 681–691.

14. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1558–1562.

15. Сиротюк В.В., Лунёв А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // Автомобильные дороги. 2016. № 6(1015). С. 72–79.

16. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khuranaa S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // Resources Policy. 2016. Vol. 49. Pp. 334–348.

17. Mukherjee P.S. Vesmawala G. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013. Vol. 8. Issue 4. Pp 23–32.

18. Mathur A. K. Khandekar R. K. New segments in ash utilization- NTPC concern // Proc. on Indian Power Station Conference, 2008. Pp. 627–631.

19. Mathur A. K. Ash utilisation in NTPC // Proc. Workshop on fly ash utilisation: Issues and strategies. Bhopal, India. Bhopal Chapter. Pp. 41–45.

20. Shamshad A. Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure International // Research Journal of Environment Sciences. 2012. Vol. 1(4). Pp. 60–64.

21. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал, 2011. № 4. С. 16–21.

22. Santamarina J.C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces // Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, 2001. Pp. 1–32. DOI: https://doi.org/10.1061/40659(2003)2.

23. Behringer R. P. Jamming in granular materials // Comptes Rendus Physique. 2015. Vol. 16. Pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001.

24. Tadanaga T. Clark A., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force networks // Phys. Rev. 2018. Vol. E 97. № 012906. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906.

25. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114 №. 144502. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502.

26. Indraratna, B., Nutalaya, P. and Koo, K.S. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill // Canadian Geotechnical journal. Vol. 28. Pp. 542–555.

27. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures // International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE. IACSIT Press, Singapore. Vol.8. Pp. 134–137.

28. Kim B. Prezzi M., Salgaro R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments // Journal of geotechnical and geo-environmental engineering. 2005. Vol. 131. Issue 7. Pp. 914-924.

29. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions // International Journal of Science and Research (IJSR). 2014. Vol.3. Issue 9. Pp. 1487–1494.

30. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 18. Pp. 3085–3106.

31. Gimhan P. G. S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material Engineer // Journal of the Institution of Engineers. Vol. 51. Pp. 49–57. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

REFERENCES

1. Sirotyuk V.V., Trojan T.P. The carbon residuum influe ce on the ashes slag's quality used in the construction technology. *Vestnik SibADI*. 2017; (6(58)): 119–125. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-119-125 (in Russian).

2. Bartov G., Deonarine A., Johnson TM., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. *Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes. Environmental Science & Technology*. Washington, D.C., 2012; 47(4): 2092–2099. DOI: 10.1021/es303111p.

3. Deonarine A., Bartov G., Johnson TM., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. *Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments. Environmental Science & Technology*. Washington, D.C., 2012; 47(4): 2100–2108. DOI: 10.1021/es303639d.

4. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., et.al. Article. *Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River. BIOS journal*. 2017; 88(2):72–85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1.

5. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P. V., Kozik V.V. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 127. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024.

6. Lihach S. A., Kulesh R. N., Nikolaeva V. I., Orlova K.Y., Ilyasova A. S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 92. No. 01051. DOI: 10.1051/matecconf/20179201051.

7. Folgueras M.B., Alonso M., Fernández F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements. *Fue*l. 2017; 192: 128–139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019.

8. Barahtenko V.V. Ocenka potrebitel'skih harakteristik izdelij iz vysokonapolnennogo polimerno-mineral'nogo kompozicionnogo materiala na osnove polivinilhlorida i othodov TES [Estimating consumer product characteristics of highly filled polymer-mineral composite material based on polyvinyl chloride and waste TPP]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 3: 17–24. DOI: 10.5862/MCE.47.2.

9. Burdonov A.E., Barahtenko V.V., Zelinskaya E.V., Suturina E.O., Burdonova A.V., Golovnina A.V. Fiziko-mekhanicheskie harakteristiki kompozicionnyh materialov na osnove ot-hodov proizvodstva s razlichnymi recepturami [Physical and mechanical properties of composite materials of different compositions based on waste products]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 9: 14–22. (in Russian).

10. Yao Z.T. Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi. Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015; 141: 105–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016 (in Russian).

11. Lebedev M.S., CHulkova I.L. Issledovaniya reologicheskih svojstv bitumnyh kompozicij, napolnennyh zolami-unosa razlichnogo sostava [Study of rheological characteristics of bitumen composites with different fly ashes]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2016; 11: 47–52 (in Russian).

12. Tolstoj A.D., Kovaleva I.A., Novikov K.YU. Sovershenstvovanie sostava i svojstv poroshkovyh betonov s tekhnogennym syr'em [Improving the structure and properties of powdered concrete on technogenic raw materials]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhno-logicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2016; 2: 19–24.

13. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35: 681–691.

14. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1558–1562.

15. Sirotyuk V.V., Lunev A.A., Ivanov E.V. Zoloshlakovaya smes' dlya zemlyanogo polotna [Coal ash and slag for road embankments]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2016; 6: 72-79 (in Russian).

16. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khuranaa S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective. *Resources Policy*. 2016; 49: 334–348.

17. Mukherjee P.S. Vesmawala G. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013; 8. Issue 4: 23–32.

18. Mathur A. K. Khandekar R. K. New segments in ash utilization- NTPC concern. *Proc. on Indian Power Station Conference*. 2008: 627–631.

19. Mathur A. K. Ash utilisation in NTPC. Proc. Workshop on fly ash utilisation: Issues and strategies. *Bhopal*, India. Bhopal Chapter: 41–45.

20. Shamshad A. Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure International. Research *Journal of Environment Sciences*. 2012; 1(4): 60–64.

21. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Primenenie zol i zoloshlakovykh otkhodovl'stve [Use of ashes and ash-and-slad wastes in construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 4: 16-21 (in Russian).

22. Santamarina J.C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces. Proc. Symp. *Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd*, 2001: 1–32. DOI: https://doi.org/10.1061/40659(2003)2.

23. Behringer R. P. Jamming in granular materials. *Comptes Rendus Physique*. 2015; 16: 10–25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001.

24. Tadanaga T. Clark A., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

networks. *Phys. Rev*. 2018; E 97. No 012906. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906.

25. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. *Phys. Rev. Lett*. 2015; 114 No. 144502. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502.

26. Indraratna, B., Nutalaya, P. and Koo, K.S. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill. *Canadian Geotechnical journal*. Vol. 28: 542-555.

27. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures. International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE. *IACSIT Press*, Singapore. Vol.8: 134–137.

28. Kim B. Prezzi M., Salgaro R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2005; 131. Issue 7: 914-924.

29. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions. *International Journal of Science and Research* (IJSR). 2014;3. Issue 9: 1487–1494.

30. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 18: 3085-3106.

31. Gimhan P. G. S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material Engineer. *Journal of the Institution of Engineers*. Vol. 51: 49–57. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лунёв Александр Александрович (г. Омск, Россия) – аспирант кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksander A. Lunev – Postgraduate Student of the Roads and Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644008, Omsk, 5, Mira Av., e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 624.04, 519.677
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЖАТЫХ ПОЛКАХ АРОЧНЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

С.А. Макеев, В.А. Горьковенко, Е. А. Сеитов, Л.Ф. Рахуба
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Стальные тонкостенные холодногнутые профили широко используются в строительстве. В арочных стальных холодногнутых профилях трапециевидного сечения остаточные нормальные напряжения, ориентированные вдоль профиля, возникают на стадии изготовления арочных заготовок из плоских профилированных листов и обусловлены технологическим процессом продольного гиба в холодном состоянии с вовлечением крайних зон профиля в пластическую стадию с разгрузкой без последующей термообработки. По предварительной оценке остаточные напряжения могут составлять при малых радиусах арочного профиля до одной трети от расчетного сопротивления листовой стали. В настоящее время остаточные технологические напряжения продольного гиба не учитываются при проектировании конструкций из тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения. Цель данной работы – разработка способа определения остаточных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов, обеспечивающего простоту методики измерений и расчета, достоверность и высокую точность полученных значений напряжений.*
Материалы и методы. *Произведен анализ ранее опубликованных материалов, выявлены преимущества и недостатки предыдущих исследований. Показаны преимущества предложенного метода определения остаточных технологических нормальных напряжений в сжатых полках арочного стального тонколистового профилированного проката.*
Результаты. *Сформирован новый способ выполнения разрезов сжатой полки и проведения измерений деформаций с целью дальнейшего определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочного стального тонколистового холоднокатаного профилированного проката. Предложенный способ в значительной степени упрощает существующую методику определения остаточных технологических нормальных напряжений в сжатых полках профиля, повышает точность измерения деформаций в сжатых полках профиля.*
Обсуждение и заключение. *Данный способ измерения деформация для определения остаточных технологических напряжений позволяет усовершенствовать существующие методы определения остаточных напряжений, упростить вычисления, а также повысить точность определения напряжений. В дальнейшем будет произведено численное моделирование технологического процесса гиба арочных профилей, а также экспериментальная оценка адекватности предложенного способа.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *остаточные нормальные напряжения, стальные тонколистовые холоднокатаные профилированные листы, физические параметры, продольный гиб, способ измерения.*

Поступила 29.01.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е. А., Рахуба Л.Ф. Определение остаточных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 758–765. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765

© Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е. А., Рахуба Л.Ф.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI:https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765

COMPRESSED FLANGES OF ARCHED STEEL THIN-WALLED COLD-ROLLED PROFILED SHEETS: DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES

Sergey A. Makeev, Viktor A. Gorkovenko, Erlan A. Seitov, Lilia F. Rahuba
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The construction sphere widely uses steel thin-walled cold-formed profiles. In arched steel cold-formed trapezoidal section profiles, residual normal stresses oriented along the profile occur at the stage of manufacturing arched blanks from flat profiled sheets and are caused by the cold bending process involving the extreme zones of the profile in the plastic stage with unloading without subsequent heat treatment. According to preliminary estimates, the residual stresses are up to one third of the calculated resistance of sheet steel at small radii of the arch profile. At present, the researchers do not take into account the residual technological stresses of the longitudinal bending when designing structures from thin-walled longitudinally bent rolled trapezoidal sections. The purpose of the paper is to develop a method for determining residual stresses in compressed flanges of arched steel thin-walled cold-rolled profiled sheets, which provides simplicity of the measurement and calculation methods, reliability and high accuracy of the obtained stress values.*

Materials and methods. *The authors made the analysis of previously published materials and identified the advantages and disadvantages of previous studies. Moreover, the authors showed the advantages of the proposed method for determining the residual technological normal stresses in compressed flanges of arched steel thin-rolled profiled steel.*

Results. *The researches formed a new method for making sections of a compressed shelf and measuring residual normal stresses in the compressed flanges of an arched steel sheet of cold-rolled profiled steel. The proposed method greatly simplified the existing method of determining residual technological normal stresses in compressed profile flanges, improved the accuracy of measuring normal stresses in compressed profile flanges.*

Discussion and conclusions. *The method of measuring residual process stresses allows improving existing methods for determining residual stresses, simplifying calculations, as well as improving the accuracy of stresses. In the future, the authors will make a numerical simulation of the bending arch profiles, as well as an experimental assessment of the adequacy of the proposed method.*

KEYWORDS: *residual normal stresses, light cold-rolled profile steel sheet, physical parameters, longitudinal bend, method of determining.*

Submitted 29.01.2019, revised 17.12.2019.
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: Makeev Sergey A., Gorkovenko Viktor A., Seitov Erlan A., Rahuba Lilia F. Compressed flanges of arched steel thin-walled cold-rolled profiled sheets: determination of residual stresses *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 758–765 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765

© Makeev S.A., Gorkovenko V.A., Seitov E.A., Rahuba L.F.

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

ВВЕДЕНИЕ

Стальные тонкостенные холодногнутые профили широко используются в строительстве [1, 2, 3, 4, 5], проводится большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований по тонкостенным конструкциям [6, 7, 8, 9, 10, 11]. В результате производственных процессов в данных холодногнутых профилях образуются остаточные напряжения [12, 13, 14, 15, 16]. В арочных стальных холодногнутых профилях трапециевидного сечения[1] остаточные нормальные напряжения, ориентированные вдоль профиля, возникают на стадии изготовления арочных заготовок из плоских профилированных листов и обусловлены технологическим процессом продольного гиба в холодном состоянии с вовлечением крайних зон профиля в пластическую стадию с разгрузкой без последующей термообработки. По предварительной оценке[2,3] остаточные напряжения могут составлять при малых радиусах арочного профиля до одной трети от расчетного сопротивления листовой стали [17, 18]. В настоящее время остаточные технологические напряжения продольного гиба не учитываются при проектировании конструкций из тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения [19, 20, 21, 22, 23, 24]. При определенных условиях такой подход может привести к аварийным ситуациям: возможно обрушение конструкций, причинение вреда здоровью людей.

Таким образом, исследование остаточных технологических напряжений в арочных тонкостенных профилях, разработка методик расчета остаточных напряжений является на сегодняшний день актуальной задачей.

Задачей исследования стала разработка экспериментального способа определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов, обеспечивающего простоту методики, достоверность и высокую точность полученных значений напряжений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Допустим, необходимо разработать арочный бескаркасный свод на базе тонкостенного продольно-гнутого проката трапециевидного сечения заданного радиуса. При изготовлении арочного профиля нужно задать параметры технологического оборудования, обеспечивающие получение необходимого радиуса гиба $R_{гиб}$ после проката. При этом проектировщику для проведения статического расчета надо знать распределение остаточных технологических нормальных напряжений продольного гиба по высоте сечения профиля $\sigma_z(y)$ для учета этих напряжений при расчете профиля на прочность и местную устойчивость.

Остаточные напряжения являются интегрально уравновешенной системой внутренних сил в сечении, однако при нагружении складываются с напряжениями, вызванными внешними нагрузками.

Известны экспериментальные способы определения остаточных технологических напряжений путем замера деформаций при помощи проволочных тензорезисторов[4], путем последовательного удаления слоев металла и замере деформаций стержня, вырезаемого из детали[5], рентгеновским способом[6].

В работе [25] предложен способ определения остаточных напряжений в арочных профилях. Сущность способа заключается в том, что полке с известным радиусом верхней поверхности полки арочного стального тонкостенного холодногнутого профиля с трапециевидными гофрами выполняют два базовых отверстия диаметром d= 3–5 мм, размещенных вдоль оси Z с расстоянием по дуге между собой L_1 = 100-200 мм и производится замер длины хорды c_1 между базовыми отверстиями. Далее, с симметричным охватом базовых отверстия, выполняется сквозной разрез П-образной формы в исследуемой

[1] ТУ 112-235-39124899-2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами / СибНИИстрой. Новосибирск, 2005. 18 с.

[2] Гришаев Н. А., Макеев С. А. К оценке остаточных напряжений в арочном прокате трапециевидного сечения // Материалы 63-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ». Омск, 2009. Кн. 1. С. 23–27.

[3] Гришаев Н. А. Экспериментальная оценка остаточных напряжений в арочном прокате трапециевидного сечения // Материалы 64-й научно-технической конференции ГОУ «СибАДИ» «Креативные походы в образовательной научной и производственной деятельности». Омск, 2010. Кн. 2. С. 210–213.

[4] Ванин В. А. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В.А. Ванин, В.Г. Однолько, С.И. Пестрецов, В.Х. Фидаров, А.Н. Колодин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. С. 122.

[5] Пат. 2121666 РФ, МПК G01L1/06 (1998.11). Способ определения остаточных напряжений / Ю.И. Замащиков.

[6] Пат. 2390763 РФ, МПК G01N23/207 (2006.01). Способ определения локальной концентрации остаточных микронапряжений в металлах и сплавах / Л.Е. Алексеева, М.Е. Гетманова, Г.А. Филиппов, Е.Х. Шахпазов.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

полке шириной b = 8-12 мм с последующим повторным замером длины хорды c_2 между базовыми отверстиями при фиксации вырезанной полосы в створе полки. По результатам измерений длин хорд c_1 и c_2 между базовыми отверстиями до и после выполнения П-образного разреза в полке определяют значения продольно ориентированных нормальных остаточных напряжений $\sigma_{z\ ост}$ в полке арочного стального тонкостенного холодногнутого профиля с трапециевидными гофрами по формуле.

Из известных технических решений наиболее близким по совокупности существенных признаков к предлагаемому способу является способ[7], основанный на том, что в выпуклой (сжатой) полке профиля выполняются сквозные разрезы в виде двух параллельных пропилов, ориентированных вдоль профиля с последующим измерением физических параметров (прогиба) и вычислением остаточных напряжений по формуле, полученной из адекватной математической модели.

Все вышеперечисленные способы обладают рядом недостатков, таких как сложность и трудоемкость процесса измерения деформаций для определения остаточных напряжений, необходимость во владении специальными навыками и специальным оборудованием.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сущность предлагаемого способа экспериментального измерения деформаций для дальнейшего определения остаточных технологических напряжений заключается в следующем: в сжатой полке арочного стального тонколистового холоднокатаного профилированного листа, имеющего ширину B, выполняются сквозные разрезы в виде двух параллельных, ориентированных вдоль профиля, пропилов (например длина $2L_o$, L_o = 100 мм), и сквозные разрезы в виде пропилов, ориентированных поперек профиля в середине расчетной длины и по краям, шириной b (рисунок 1). Прорези выполняются при помощи лазерной[8] либо гидроабразивной резки[9].

За счет высвобождения сжимающих остаточных напряжений полуполосы L_0 удлиня-

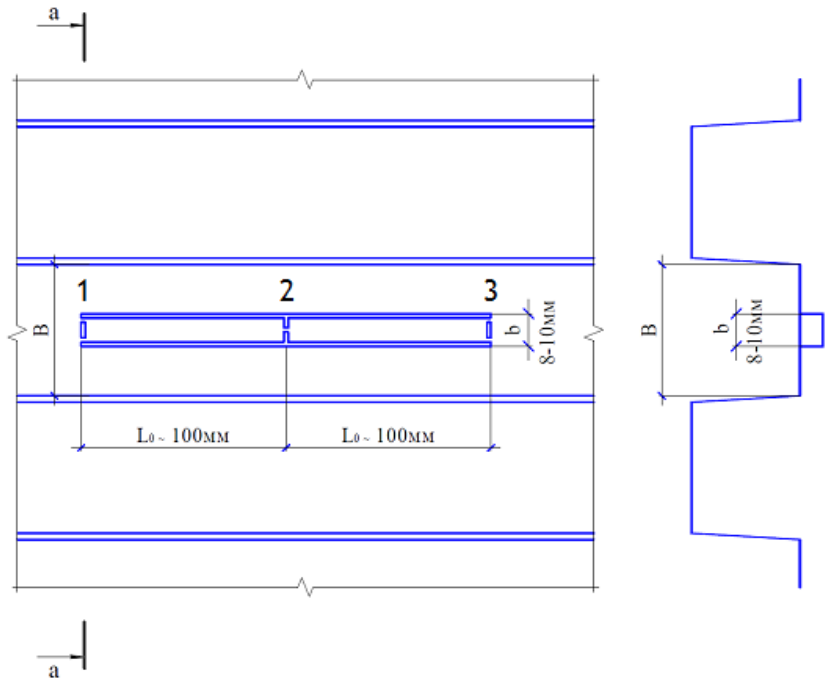


Рисунок 1 – Схема выполнения прорезей в сжатой полке арочного профилированного листа

Figure 1 – Scheme of the slots in the compressed shelf arched profiled steel sheet

[7] Пат. 2455622 Российская Федерация, МПК G 01 L 1/06. Способ определения остаточных напряжений / С.А. Макеев, Д. А. Кузьмин, Н. А. Гришаев ; СибАДИ. № 2011105715/28 ; заявл. 15.02.2011 ; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

[8] Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная резка металлов. М. : Высш. шк., 1988. 127 с.

[9] Пат. 2475350 РФ: МПК B 24C 1/00 (2006.01), B 24C 5/02 (2006.01), B 23K 26/42 (2006.01): Способ гидроабразивной резки листового металлического материала / А.А. Барзов, А.А. Лыгина [и др.] ; ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». № 2010154316/02 ; заявл. 30.12.2010 ; опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ются. В результате таких деформаций образуются три пластических шарнира на концах полупосос 1, 2, 3 с образованием двухзвенного механизма 1-2, 2-3. При этом шарнир 2 получает некое перемещение Δ наружу относительно выпуклой поверхности полки (рисунки 2, 3).

Замерив величину Δ микрометром, можно в первом приближении, считая полуполосы прямолинейными в пределах образовавшихся длин L, определить остаточные напряжения $\sigma_{z\ ост}$ в сжатой полке профиля. Следующим этапом можно уточнить найденные значения напряжений с учетом технологической кривизны полуполос.

На рисунке 3 представлен эскиз стального тонколистового холоднокатаного профилированного арочного листа на участке выполнения прорезей с указанием качественной картины распределения остаточных напряжений по высоте сечения профиля и поворотом механизма полуполос 1-2, 2-3, в результате которого шарнир 2 переместится на величину Δ.

Теоретический расчет остаточных технологических напряжений:

Абсолютное удлинение полуполосы после ее выреза

$$dL = L - L_0. \quad (1)$$

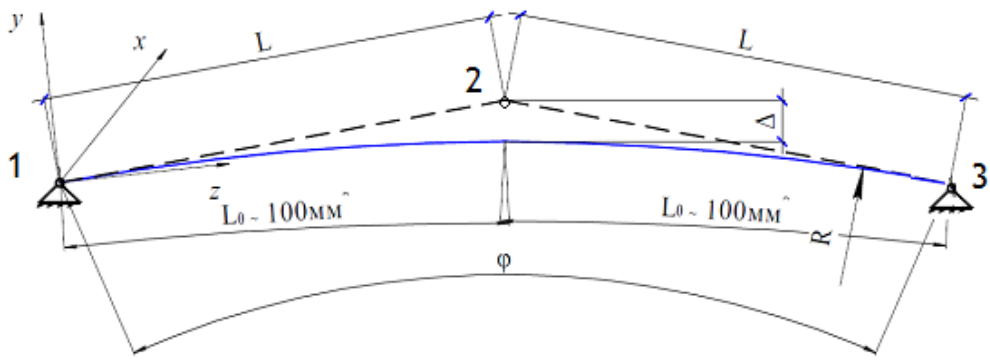


Рисунок 2 – Расчетная схема вырезанных пластин

Figure 2 – Design scheme of cut bands

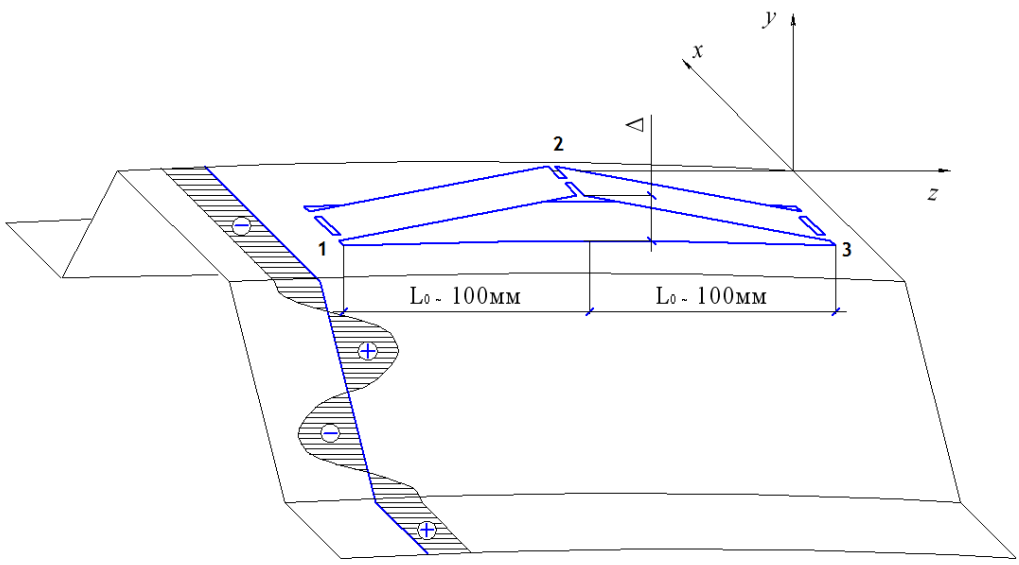


Рисунок 3 – Фрагмент стального арочного профилированного листа и эпюра распределения остаточных напряжений

Figure 3 – Fragment of an arched profiled steel sheet and a plot of residual stress distribution

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Остаточные напряжения равны

$$\sigma_{z\,\text{ост}} = -E \cdot \varepsilon_z, \quad (2)$$

где $\varepsilon_z = dL/L_0$ – относительные деформации, таким образом

$$\sigma_{z\,\text{ост}} = -E \cdot \frac{L - L_0}{L_0}. \quad (3)$$

Величина L вычисляется по теореме Пифагора как гипотенуза прямоугольного треугольника с катетами L_0 и Δ:

$$L = \sqrt{{L_0}^2 + \Delta^2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в формулу (3), получим первое приближение остаточных сжимающих напряжений в полке

$$\sigma_{z\,\text{ост}} = -E \cdot \frac{\sqrt{{L_0}^2 + \Delta^2} - L_0}{L_0}. \quad (5)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан экспериментальный способ определения остаточных нормальных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов. Данный способ позволяет определять остаточные напряжения в сжатой полке путем измерения фактических параметров деформаций вырезанных элементов.

2. Использование высокотехнологичных операций (выполнение прорезей лазером либо гидроструей) позволяет достаточно быстро, без использования специального оборудования, измерять деформации для дальнейшего определения остаточные напряжения в сжатых полках арочных холоднокатаных профилированных листах.

3. Для подтверждения достоверности и точности предлагаемого экспериментального способа необходимо произвести численное моделирование гиба арочных профилей, например в программе ANSYS Structures[10], а также произвести экспериментальную оценку адекватности данного способа.

4. Данные о распределении расчетных остаточных технологических напряжений продольного гиба арочных прокатных профилей для практического диапазона радиусов строительных конструкций должны быть включены в параметры сортамента арочных профилей наравне с геометрическими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жданов Д. А., Уласевич В. П. Бескаркасные арочные покрытия из стальных тонкостенных профилей: история, современное состояние и перспективы применения в Республике Беларусь // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. 2016. № 1 : Строительство и архитектура. С. 30–34.

2. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И., Липленко М.А. Перспективы ЛСТК в России // СтройПРОФИ. 2013. № 10. С. 12–17.

3. Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Арменский М. Ю. Новые типы бескаркасных зданий и перспективы их развития // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 10. С. 27–29.

4. Рудак А. В., Беляев Н. В. Ограждающие конструкции из тонколистового трапециевидного профиля // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. Вып. 3 (13). С. 40–45.

5. Красотина Л.В., Краснощеков Ю.В., Мосенкис Ю. М. Использование арочного профнастила при реконструкции зданий // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 14. С. 41–46.

6. Липленко М.А., Айрумян Э.Л. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 42–44.

7. Жданов Д. А., Уласевич В. П. К определению эффективных сечений стальных бескаркасных арочных покрытий по Еврокоду // Строительная наука и техника. 2013. № 2. С. 22–26.

8. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Арменский М.Ю. К проектированию бескаркасных конструкций арочных сводов из холодногнутых тонколистовых стальных профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. № 7. С. 2–3.

9. Красотина Л. В., Красношеков Ю. В., Макеев С. А., Селиванов А. В. Результаты экспериментального поведения несущего арочного покрытия из трапециевидного профиля // Омский научный вестник. 2007. № 2 (56). С. 38–42.

10. Липленко М.А. Метод нагружения арочный конструкции при испытаниях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3 (254). С. 57–61.

11. Липленко М.А., Кунин Ю. С., Володин М. В. Экспериментальные исследования профилированного настила нового типа // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6 (263). С. 67–76.

12. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: a closed-form analytical solution // Engineering Structures. 2004. Vol. 26, Issue 9. P. 1249–1259. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.04.005.

13. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections. I: Coiling and uncoiling of sheets // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65, Issue 8-9. P. 1803–1815. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.007.

[10] ANSYS structures. URL: https://www.ansys.com/products/structures (дата обращения: 23.12.2018).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

14. Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F. Residual stresses in press-braked stainless steel sections. II: Press-braking operations // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65, Issue 8-9. P. 1816–1826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.011.

15. Cristopher D. Moen, Takeru Igusa, Schafer B. W. Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members // Thin-Walled Structures. 2008. Vol. 46, Issue 11. P. 1274–1289. DOI: 10.1016/j.tws.2008.02.002.

16. Jacques Rondal. Residual stresses in cold-rolled profiles // Construction and Building Materials. 1987. Vol. 1, Issue 3. P. 150–164. DOI: 10.1016/0950-0618(87)90016-X.

17. Макеев С. А., Колмаков Д. М. Моделирование остаточных напряжений в арочном тонкостенном прокате трапециевидного сечения // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 69–73.

18. Макеев С. А., Гришаев Н. А. Численный анализ прочности и местной устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения с учетом остаточных напряжений продольного гиба // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 2. С. 37–40.

19. Макеев С. А. [и др.]. Методы расчета и испытаний легких ограждающих конструкций: монография / Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 124 с.: ил.

20. Холкин Е. Г., Соколовский З. Н. Методика расчета трапециевидных тонкостенных профилей с учетом местной потери устойчивости // Омский научный вестник. 2010. № 3. С. 50–53.

21. Уласевич В. П., Жданов Д. А. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. 2015. № 1 : С. 66–72.

22. Макеев С. А., Гришаев Н. А. Численное исследование местной устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 93–97.

23. Кузьмин Д. А. Математическая модель тонкостенных связей в составе трехслойных цилиндрических покрытий // Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. 2012. №4 (26). С. 41–48.

24. Рудак А. В., Макеев С. А. Математическая модель бескаркасного двухслойного арочного свода из холодногнутых тонколистовых стальных профилей // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 2. С. 1–6.

25. Сеитов Е. А., Макеев С. А. Способ определения остаточных напряжений в арочных профилях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Том 7, № 1. С. 146–153.

REFERENCES

1. Zhdanov D., Ulasevitch W. Beskarkasnoe arochnye pokrytiya iz stal'nyh tonkostennyh profilej istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniya v Respublike Belarus' [Frameless arch coverings made of thin-walled steel profiles: history, current state and prospects of application in the Republic of Belarus]. *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta*. 2016; 1: Stroitel'stvo i arhitektura: 30–34 (in Russian).

2. Liplenko M.A., Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I. Perspektivy LSTK v Rossii [Prospects of lsts in Russia]. *StrojPROFI*, 2013; 10: 12–17 (in Russian).

3. Vedjakov I. I., Solov'ev D. V., Armenskij M. Ju. Novye tipy beskarkasnyh zdanij i perspektivy ih razvitija [New types and prospects of carkless buildings]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2009; 10: 27–29. (in Russian).

4. Rudak A. V., Beljaev N. V. Ograzhdajushhie konstrukcii iz tonkolistovogo trapecievidnogo profi-lj [Enclosing structures of thin-sheet trapezoidal profile] *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii.* 2009; 3 (13): 40–45 (in Russian).

5. Krasotina L.V., Krasnoshchekov Yu.V., Mosenkis Yu.M. Ispol'zovanie arochnogo profnastila pri rekonstrukcii zdanij [Use of arched corrugated board during the reconstruction of buildings]. *Vestnik SibADI*. 2009; 4 (14): 41–45 (in Russian).

6. Liplenko M. A., Ayrumyan E.L. Osobennosti raboty beskarkasnyh arochnyh pokrytij iz stal'nyh holodnognutyh profilej [Features of work of frameless arch coverings from steel cold-formed profiles]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; 6: 42–44 (in Russian).

7. Zhdanov D. A., Ulasevich V. P. K opredeleniju jeffektivnyh sechenij stal'nyh beskarkasnyh arochnyh pokrytij po Evrokodu [To the definition of effective sections of steel arc-free arch coatings on the Eurocode]. *Stroitel'naja nauka i tehnika*. 2013; 2: 22–26. (in Russian).

8. Eremeev P.G., Kiselev D.B., Armenskij M.Ju. K proektirovaniju beskarkasnyh konstrukcij aroch-nyh svodov iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profile [To design of arch-free structures of arched arches from cold-bent thin-sheet steel profiles]. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*. 2004; 7: 2–3. (in Russian).

9. Krasotina L. V., Krasnoshekov Ju. V., Makeev S. A., Selivanov A. V. Rezul'taty jeksperimental'-nogo povedenija nesushhego arochnogo pokrytija iz trapecievidnogo profilja [Results of experimental behavior of bearing arch coating from trapezoidal profile]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2007; 2 (56): 38–42. (in Russian).

10. Liplenko M.A. Metod nagruzhenija arochnyj konstrukcii pri ispytanijah [Method of loading arch structure during tests]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij.* 2014; 3 (254): 57–61. (in Russian).

11. Liplenko M.A., Kunin Ju. S., Volodin M. V. Jeksperimental'nye issledovanija profilirovannogo nastila novogo tipa [Experimental studies of profiled flooring of new type]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2015;6 (263): 67–76 (in Russian).

12. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. Residual stresses in steel sheets due to coiling and uncoiling: a closed-form analytical solution. *Engineering Structures*. 2004; 26, iss. 9: 1249–1259. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.04.005.

13. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. *Residual stresses in press-braked stainless steel sections. I: Coiling and uncoiling of sheets.* Journal of Constructional Steel Research. 2009; 65, iss. 8–9: 1803-1815. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.007.

14. Quach W. M., Teng J. G., Chung K. F. *Residual stresses in press-braked stainless steel sections. II: Press-braking operations*. Journal of Constructional Steel Research. 2009; 65, iss. 8–9:1816-1826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.04.011.

15. Cristopher D. Moen, Takeru Igusa, Schafer B. W. *Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members.* Thin-Walled Structures. 2008; 46, iss. 11: 1274–1289. DOI: 10.1016/j.tws.2008.02.002.

16. Jacques Rondal. *Residual stresses in cold-*

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

rolled profiles. Construction and Building Materials, 1987; 1, iss. 3: 150–164. DOI: 10.1016/0950-0618(87)90016-X.

17. Makeev S.A., Kolmakov D.M. Modelirovanie ostatochnyh napryazhenij v arochnom tonkostennom prokate trapecievidnogo secheniya [Modeling of residual stresses in arched thin-walled rolling of a trapezoidal section]. *Omskiy nauchnyy vestnik.* 2014; 1 (127): 69–73 (in Russian).

18. Makeev S A, Grishaev N A Chislennyj analiz prochnosti i mestnoj ustojchivosti arochnyh profilej trapecievidnogo secheniya s uchetom ostatochnyh napryazhenij prodol'nogo giba [Numerical analysis of strength and local stability of trapezoidal arched profiles taking into account residual stresses of longitudinal bending]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2010; 2: 37–40 (in Russian).

19. Makeev S A et al. *Metody rascheta i ispytanij legkih ograzhdayushchih konstrukcij* [Methods of calculation and testing of light enclosure structures]. OmSTU, 2016, 124 p (in Russian).

20. Kholkin E.G., Sokolovskiy Z.N. Metodika rascheta trapecievidnyh tonkostennyh profilej s uchetom mestnoj poteri ustojchivosti [Design of trapezoid thin-walled profiles taking into account local loss of stability]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2010; 3: 50–53 (in Russian).

21. Ulasevich V. P., Zhdanov D. A. Deformacionnyj raschet beskarkasnyh arochnyh pokrytij iz stal'nyh tonkostennyh holodnognutyh profilej [Deformation calculation of cartless arch coatings made of steel thin-walled cold-bent profiles]. *Vestn. Brest. gos. tehn. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2015; 1: 66–72. (in Russian).

22. Makeev S. A., Grishaev N. A. Chislennoe issledovanie mestnoj ustojchivosti arochnyh profilej trapecievidnogo sechenija [Numerical study of local stability of arched profiles of trapezoidal section]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2010; 1 (87): 93–97 (in Russian).

23. Kuz'min D. A. Matematicheskaja model' tonkostennyh svjazej v sostave trehslojnyh cilindricheskih pokrytij [Mathematical model of thin-walled bonds in the composition of three-layer cylindrical coatings]. *Vestnik SibADI*. 2012; 4 (26): 41–48 (in Russian).

24. Rudak A. V., Makeev S. A. Matematicheskaja model' beskarkasnogo dvuhslojnogo arochnogo svoda iz holodnognutyh tonkolistovyh stal'nyh profilej [Mathematical model of a double-layer arch-free vault of cold-bent thin-sheet steel profiles]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 2009; 2: 1–6 (in Russian).

25. Seitov E. A., Makeev S. A. Sposob opredelenija ostatochnyh naprjazhenij v arochnyh profiljah [Method of determining residual stresses in arch profiles]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*. 2019; 7, № 1: 146–153 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Макеев С. А. Рекомендации по исследованию материалов. Формирование разделов*: «*Результаты»(1/2). Проверка статьи.

Горьковенко *В. А. Исследование и анализ матери*алов. Формирование разделов: «Материалы и методы» (1/2), «Обсуждение и заключение» *(1/2).*

Сеитов Е. А. Исследование и анализ материалов. Формирование разделов: «Введение», «Материалы и методы» (1/2), «Результаты» *(1/2). Корректировка статьи.*

Рахуба Л. Ф. Формирование разделов: «Аннотация», «Обсуждение и заключение» *(1/2).*

AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergey A. Makeev – recommendations for the study of materials; formation of the "Results" (1/2) sections.

Viktor A. Gorkovenko – research and analysis of materials; formation of the "Materials and methods" (1/2), "Discussion and conclusions" (1/2) sections.

Erlan A. Seitov – research and analysis of materials; formation of the "Introduction", "Materials and methods" (1/2), "Results" (1/2) sections.

Lilia F. Rahuba – formation of the "Abstract", "Discussion and conclusions" (1/2) sections.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макеев Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции», ORCID: 0000-0002-2915-982X , ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: makeev608079@mail.ru).

Виктор Александрович Горьковенко – аспирант кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: otlichnik594@mail.ru).

Сеитов Ерлан Ахтамович – аспирант кафедры «Строительные конструкции», ORCID: 0000-0002-7287-0940, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: simbaev92@mail.ru).*

Рахуба Лилия Федоровна – канд. пед. наук, доц. кафедры «Иностранные языки», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lira_omsib@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Makeev – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Building Construction, ORCID: 0000-0002-2915-982X, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: makeev608079@mail.ru).

Viktor A. Gorkovenko – Postgraduate Student, Department of Building construction, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: otlichnik594@mail.ru).

Erlan A. Seitov – Postgraduate Student, Department of Building construction, ORCID: 0000-0002-7287-0940, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: simbaev92@mail.ru).*

Lilia F. Rahuba – Cand. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor of the Foreign Languages Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: lira_omsib@mail.ru).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

УДК 625.7
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-766-779

ПРИМЕНЕНИЕ ШЛАКОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Т. Пименов, В.С. Прибылов
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. *Статья посвящена результатам исследований характеристик металлургических шлаков на примере отходов металлургического производства г. Новокузнецка Кемеровской области с целью их применения в составе асфальтобетонных смесей для дорожного строительства, методах проектирования и эксплуатационных особенностях работы асфальтового бетона на шлаковых заполнителях. Целью исследования является обоснование возможности применения металлургических шлаков Новокузнецкого металлургического комбината в качестве минерального остова асфальтобетона дорожных покрытий для повышения его эксплуатационной надежности. Авторами на основании исследования физико-механических свойств асфальтовяжущего вещества и испытания опытных образцов подтверждена повышенная по сравнению с традиционными смесями сдвигоустойчивость и трещиностойкость шлакоасфальтобетона. Рассматриваемый вопрос является актуальным с точки зрения поиска более эффективных строительных материалов в условиях развития ресурсосберегающих технологий и повышения требований к экологической обстановке регионов РФ.*
Материалы и методы. *Исследования металлургического шлака проводились путем определения их физико-механических характеристик в соответствии с существующей нормативно-технической базой при использовании современных средств измерений и испытательного оборудования.*
Результаты. *Полученные результаты исследования позволили подобрать составы шлакоасфальтобетонных смесей, соответствующих требованиям существующей нормативно-технической базы по всему ряду физико-механических показателей и эксплуатационных характеристик и превышающие их.*
Обсуждение и заключение. *Применение металлургических шлаков Новокузнецкого металлургического комбината в качестве заполнителя шлакоасфальтобетона позволит увеличить его эксплуатационные характеристики с одной стороны, что особенно важно в условиях интенсивной транспортной нагрузки и резко континентального климата; с другой стороны позволит сократить себестоимость таких смесей по сравнению с традиционными лагодаря применению в них отходов промышленного производства. Металлургические шлаки могут стать заменой и серьезным подспорьем для природных строительных материалов при приготовлении и укладке асфальтобетонных смесей на городских улицах и дорогах различных категорий.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *строительные материалы, отходы металлургических производств, металлургические шлаки, асфальтобетонные смеси, эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий.*

Поступила 26.09.2019, принята к публикации 17.12.2019.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке и проведении испытаний коллективу испытательной лаборатории ООО «МераТех» (г. Новосибирск), начальнику лаборатории ООО «Технадзор» (г. Новосибирск) В.С. Лизанец.*

Для цитирования: Пименов А.Т., Прибылов В.С. Применение шлаковых заполнителей в составе асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6): 766–779. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-766-779

© Пименов А.Т., Прибылов В.С.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI:https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-766-779

APPLICATION OF SLAG FILLERS IN THE ASPHALT CONCRETE COMPOSITION FOR INCREASING THE ROAD COATING'S DURABILITY

Alexander T. Pimenov, Viacheslav S. Pribylov,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *The paper presents the research results of the metallurgical slag characteristics on the example of metallurgical waste of Novokuznetsk in the Kemerovo region. Moreover, the paper demonstrates the ways of metallurgical waste's usage in the asphalt mixes' composition for the road construction and shows design methods and features of the asphalt concrete on slag aggregates. The aim of the research is to substantiate the possibility of using steelmaking slags of the Novokuznetsk Metallurgical Plant as a mineral skeleton of asphalt concrete pavement to increase its operational reliability. Basing on the research of the physicomechanical properties of asphalt binder and testing of prototypes, the authors confirm the increased shear strength of asphalt concrete on slag aggregates and resistance to cracking in comparison with traditional mixtures. The issue under consideration is relevant by finding more efficient building materials in the context of the development of resource-saving technologies and increasing environmental requirements in the Russian regions.*
Materials and methods. *The authors carried out investigations of metallurgical slag by determining their physical and mechanical characteristics in accordance with the existing regulatory and technical base using modern measuring instruments and testing equipment.*
Results. *As a result, the authors selected compositions of slag asphalt concrete mixtures that satisfied the requirements of the existing regulatory and technical base across the entire spectrum of physical and mechanical parameters and operational characteristics.*
Discussion and conclusion. *The use of metallurgical slags of the Novokuznetsk Metallurgical Plant as a filler for asphalt concrete increases its operational characteristics, especially those, which are important in conditions of intense traffic load and sharply continental climate and those, which reduce the cost of such mixtures compared to traditional ones due to the use of industrial waste in them. Therefore, the metallurgical slag seriously competes with natural building materials in the preparation and laying of asphalt mixtures for streets and roads of various categories.*

KEYWORDS: *building materials, secondary materials of metallurgical productions, steel-smelting slags, asphalt concrete mixtures, operational characteristics of asphalt concrete pavements.*

Submitted 26.09.2019, revised 17.12.2019.
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.

ACKNOWLEDGMENTS. *The authors express their gratitude to the staff of the «MeraTech» LLC testing laboratory (Novosibirsk, Russia) and to V.S. Lizanez, the head of the «Technadzor» LLC laboratory (Novosibirsk, Russia) for helping of the research conduction.*

For citation: Pimenov Alexander T., Pribylov Viacheslav S. Application of slag fillers in the asphalt concrete composition for increasing the road coating's durability. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(6): 766–779 (in Russ.). https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-766-779

© Pimenov A.T., Pribylov V.S.

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

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги имеют важное стратегическое, экономическое и социальное значение для нашей страны. Несоответствие состояния дороги условиям движения транспортного потока и требованиям нормативно-технических документов приводит к снижению скорости его движения и росту дорожно-транспортных происшествий по дорожным условиям. В настоящее время свыше 70% федеральной дорожной сети РФ общего пользования имеют твердые асфальтобетонные покрытия, которые могут быть подвержены в процессе их эксплуатации различным разрушениям и деформациям [1]. Данная ситуация связана со следующими внешними факторами:

1. Во-первых, это возрастающая из года в год нагрузка от подвижного состава, рост которой существенно сокращает межремонтные сроки асфальтобетонных покрытий (в соответствии с Постановлением Правительства от 30.05.2017 г. № 658[1] это 12 лет).

2. Во-вторых, привязанность продолжительности строительного сезона к климатическим условиям района строительства и ремонта таких покрытий горячими асфальтобетонными смесями (несмотря на использование ПАВ и так называемых теплых смесей), а также влияние на транспортно-эксплуатационное состояние дорог качества самих работ подрядных организаций.

3. В-третьих, постоянные тенденции роста стоимости расходных строительных материалов для приготовления асфальтобетонных смесей, а также хроническое недофинансирование ремонтных и восстановительных работ.

Все вышеперечисленное в условиях реализации в РФ национальных проектов по приведению в нормативное состояние дорожной сети стимулирует постоянный поиск более эффективных строительных материалов[2], которые в условиях сложившейся экономики позволят получить наиболее качественный и надежный продукт в виде дорожного покрытия. Рассматривая эксплуатационные воздействия, способствующие разрушению структуры асфальтобетона, условно выделяют следующие факторы [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]:

1. Воздействие автотранспортных средств на асфальтобетон дорожной одежды.

2. Воздействие окружающей среды, вызывающее снижение структурно-механических характеристик асфальтовых бетонов.

3. Воздействие факторов, связанных с эксплуатацией асфальтобетонных покрытий.

При пониженных температурах в условиях жесткопластической и упругой работы систем «покрытие – основание» как характерных моделей слоистых систем возможно насыщение асфальтобетонного покрытия атмосферными осадками. Данное обстоятельство связано с понижением плотности воды при приближении температуры воздуха к 0^0 С и, как следствие, повышением ее проникающей способности. За счет расширяющего действия линз оставшейся во внутренних порах покрытия воды при падении температуры окружающей среды ниже 0^0 С, а также в условиях попеременного замораживания – оттаивания может происходить интенсивное разрушение асфальтового бетона.

Современные покрытия должны обеспечивать повышенную сдвигоустойчивость – при высоких летних температурах, трещиностойкость – при пониженных температурах, высокую коррозийную стойкость – при воздействии противогололедных материалов. Для реализации вышеуказанных требований в настоящее время применяются различные системы модификаторов, начиная от улучшения окисленного битума различными ПАВ органического и неорганического происхождения и заканчивая усилением минерального каркаса и новыми методами проектирования (например, метод Маршала по ТР ТС 014/2011[3] и система проектирования асфальтобетонных смесей (СПАС) по методологии *Superpave*). Несмотря на положительный опыт применения дорожно-строительными организациями таких методов и материалов, это существенно увеличивает себестоимость конечной продукции. В качестве альтернативного дешевого источника сырья для приготовления горячих асфаль-

[1] Постановление Правительства РФ от 30.05.2017 N 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения».

[2] Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2016 N 868-р (ред. от 23.11.2016) «О Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года».

[3] Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 N 827 (ред. от 12.10.2015) «О принятии технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (вместе с ТР ТС 014/2011. Технический регламент Таможенного союза. Безопасность автомобильных дорог).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

тобетонных смесей в лаборатории ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) г. Новосибирска был исследован металлургический шлак Новокузнецкого металлургического комбината.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования металлургического шлака проводились в соответствии с ГОСТ 3344–83[4], ГОСТ 8735–88[5], ГОСТ 8269.0–97[6] – для мартеновского и конвертерного шлака и ГОСТ Р 52129–2003[7] – для шлака печь-ковш соответственно, который предполагается использовать в качестве минерального порошка. Результаты лабораторных испытаний представлены в таблицах 1, 2, 3, 4, 5.

Таблица 1
Марка по дробимости металлургического шлака

Table 1
Steelmaking slag crushing grade

Наименование металлургического шлака	Марка по дробимости	Требования ГОСТ 9128–2013
1	2	3
Мартеновский	600 – 800	Для асфальтобетонных смесей типов Б, В марка II – не менее 800
Конвертерный	800 – 1000	

Таблица 2
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы в металлургическом шлаке

Table 2
Content of lamellar and needle-shaped grains in the steelmaking slag

Наименование металлургического шлака	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	Требования ГОСТ 9128–2013
1	2	3
Мартеновский	3	Не более (10) 15 % для щебня, не более 25% для отсевов дробления горных пород
Конвертерный	2	
Печь-ковш	0	

[4] ГОСТ 3344-83 Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия (с изменением №1): утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 20 октября 1983 г. № 281: дата введения 1992-01-01. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.

[5] ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний (с изменениями №1,2): утвержден и введен в действие Постановлением Государственного строительного комитета СССР от 05 октября 1988 № 203: дата введения 1989-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 29 с.

[6] ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний (с изменениями №1,2): утвержден и введен в действие Постановлением Госстроя России от 06 января 1998 № 18-1: дата введения - 1998-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 56 с.

[7] ГОСТ Р 52129–2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия: утвержден и введен в действие Постановлением Госстроя России от 27 июня 2003 № 119: введен впервые: дата введения - 2003-10-01. М.: ГУП ЦПП, 2004. 33 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Показатели мартеновского и конвертерного металлургических шлаков

Table 3
Properties of the open-hearth and converter steelmaking slag

Измеряемый показатель испытываемой продукции	Наименование металлургического шлака	
	Мартеновский шлак	Конвертерный шлак
1	2	3
Истинная плотность, кг/м^3	2230	2400
Средняя плотность, кг/м^3	1200	1730

Таблица 4
Показатели металлургического шлака печь-ковш

Table 4
Properties of the steelmaking slag

Измеряемый показатель испытываемой продукции	Наименование НТД	Требование для МП-2 и отходов промышленного производства	Фактический показатель
1	2	3	4
Зерновой состав мельче			
1,25 мм	ГОСТ Р 52129–2003	Не менее 95	>90
0,315 мм	ГОСТ Р 52129–2003	От 80 до 95	81
0,071 мм	ГОСТ Р 52129–2003	Не менее 60	>60
Истинная плотность, кг/м^3	ГОСТ Р 52129–2003	Не нормируется	2730
Средняя плотность, кг/м^3	ГОСТ Р 52129–2003	Не нормируется	1180
Битумоемкость, г	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 80	74
Пористость, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 40%	40
Набухание образцов из смеси порошка с битумом, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 3%	1,6
Влажность по массе, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 2,5%	0,17
Водостойкость образцов из смеси порошка с битумом	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 0,70	0,70

Содержание в химическом составе CaO (см. таблицу 5) обуславливает лучшее сцепление металлургических шлаков с битумом по сравнению с кислыми породами. Эти особенности предопределяют специфические свойства асфальтобетона на шлаковых заполнителях [13, 14].

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 5
Химический состав металлургических шлаков, %

Table 5
Chemical composition of the steelmaking slag,%

Шлак	Химический состав основных элементов металлургических шлаков,%					
	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S
Мартеновский	16,82	19,36	30,91	12,05	6,38	0,16
Конвертерный	23,50	18,40	32,70	8, 74	5,64	0,05

Для оценки основных эксплуатационных характеристик шлакоасфальтобетонных смесей в лаборатории ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) были приготовлены и исследованы образцы асфальтовяжущего вещества на основе металлургического шлака печь-ковш (рисунок 1). Приготовление образцов асфальтовяжущего вещества выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52129–2003 п.7.6, п.7.7 в металлических формах d=50,5 мм. В качестве вяжущего был применен битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133–2014. Для обеспечения требуемой степени водонасыщения от 4 до 5% расход вяжущего для приготовления образцов – цилиндров составил 21% от массы минеральной части, то есть соотношение Б/МП = 0,21. Температура приготовления образцов составляла 150–160^0 С и соответствовала требованиям ГОСТ Р 52129–2003 как для отходов промышленного производства.

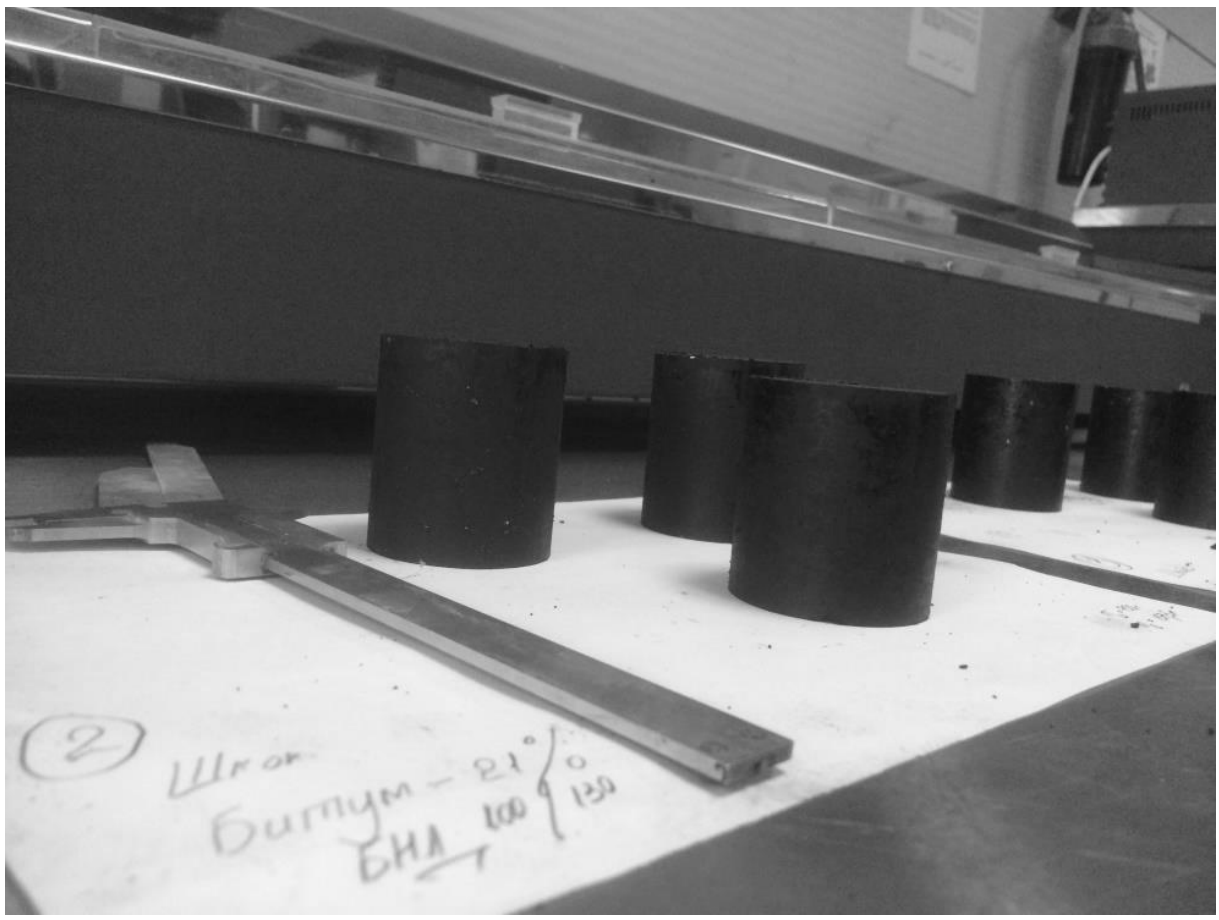


Рисунок 1 – Образцы асфальтовяжущего вещества на основе металлургического шлака печь-ковш

Figure 1 – Samples of the bitumen-mineral mixture based on the steelmaking slag

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Анализ морфологии и показателей физико-механических свойств асфальтовяжущего вещества на основе белого шлака печь-ковш показал, что прогнозируемая сдвигоустойчивость, водостойкость и трещиностойкость шлакоасфальтобетона, связанная с его структурой, позволяет укладывать его в местах, подверженных сдвиговым деформациям в условиях знакопеременных температур. Установлено, что при использовании в качестве минерального порошка белого шлака печь-ковш в структуре исследуемого материала возникают замкнутые поры. Наличие системы замкнутых пор в образцах асфальтовяжущего вещества и интенсивное нарастание прочности предопределяет (рисунок 2) образование в структуре материала микротрещин.

Последние, учитывая их размеры ($<10^{-6}$ м), позволят исключить возможность проникновения в них воды, а напряжения на их границах будут гораздо ниже предела прочности на растяжение самого асфальтобетона [23,24,25]. Данное обстоятельство в процессе эксплуатации дорожного покрытия при отрицательных температурах воздуха (ниже температуры хрупкости самого битума) позволяет исключить образование низкотемпературных макротрещин ($>10^{-3}$ м), тем самым сохраняя требуемую сплошность и ровность поверхности асфальтобетона.

Длительное насыщение водой образцов асфальтовяжущего вещества на основе металлургического шлака печь-ковш позволило установить связь между продолжительностью насыщения ее водой и величиной водостойкости (рисунок 3).

Такую зависимость можно представить в следующем виде:

$$y = 0{,}8916x^{0.1541},$$

где x – это продолжительность насыщения водой, сут, у – коэффициент водостойкости. Ошибка аппроксимации составляет не более 4%.

Установленная в результате эксперимента длительная водостойкость образцов асфальтовяжущего вещества (свыше 1,0), превышающая установленные требования по ГОСТ 9128–2013 и ГОСТ Р 52129–2003, предопределена способностью металлургического шлака к кристаллизации уже как гидравлического вяжущего (рисунок 4). Образуется так называемая коагуляционно-кристаллизационная микроструктура.

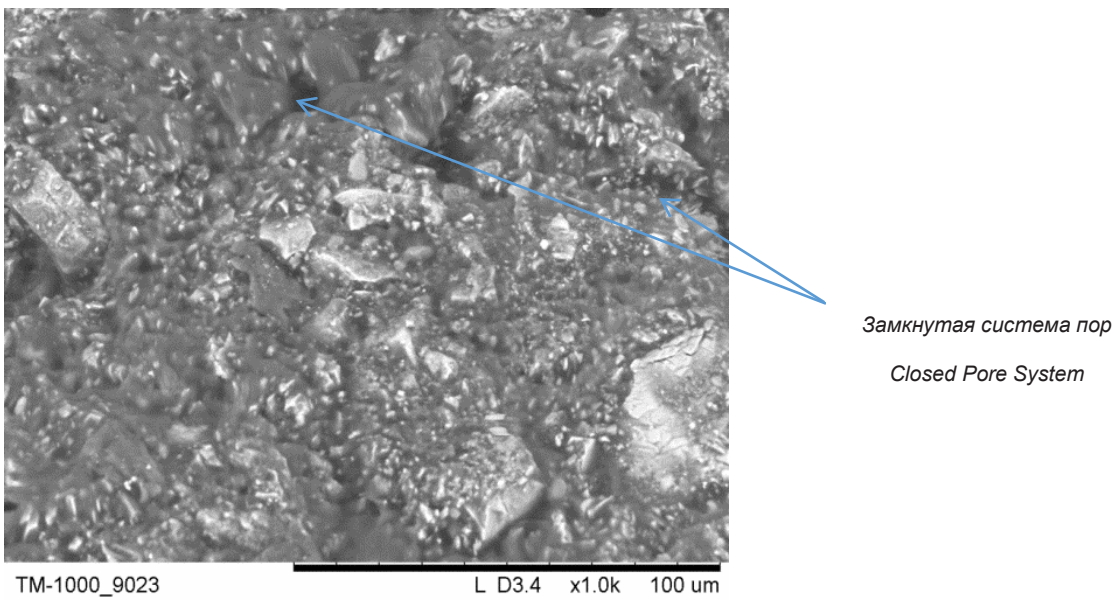


Рисунок 2 – Морфология асфальтовяжущего вещества на металлургическом шлаке (микроскоп сканирующий электронный HITACHI TM1000 Hitachi, Япония)

Figure 2 – Morphology of asphalt binder with the steelmaking slag (HITACHI TM1000 Hitachi Scanning Electronic Microscope, Japan)

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

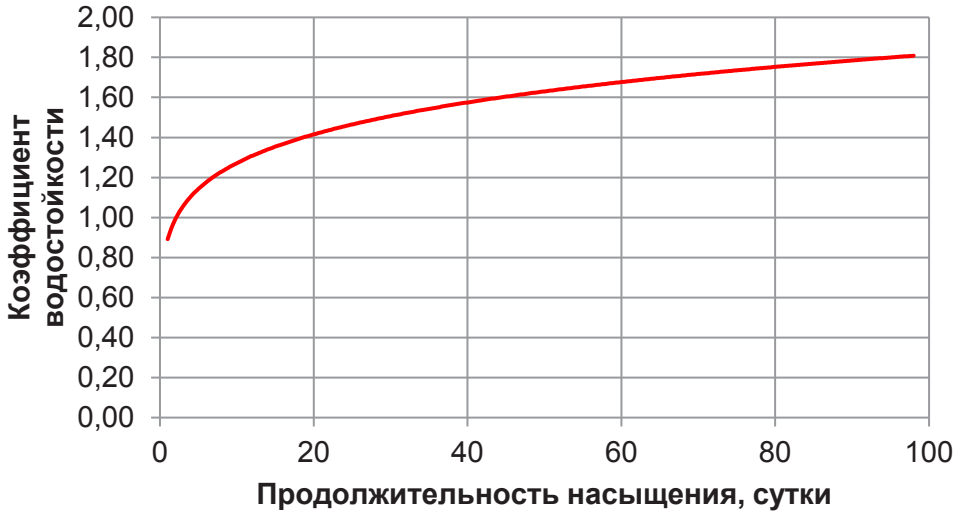


Рисунок 3 – Зависимость прочности асфальтовяжущего вещества на металлургическом шлаке от продолжительности водонасыщения образцов водой

Figure 3 – Dependence of the bitumen-mineral mixture's strength of the steelmaking slag on the duration of the water saturation of the samples with water

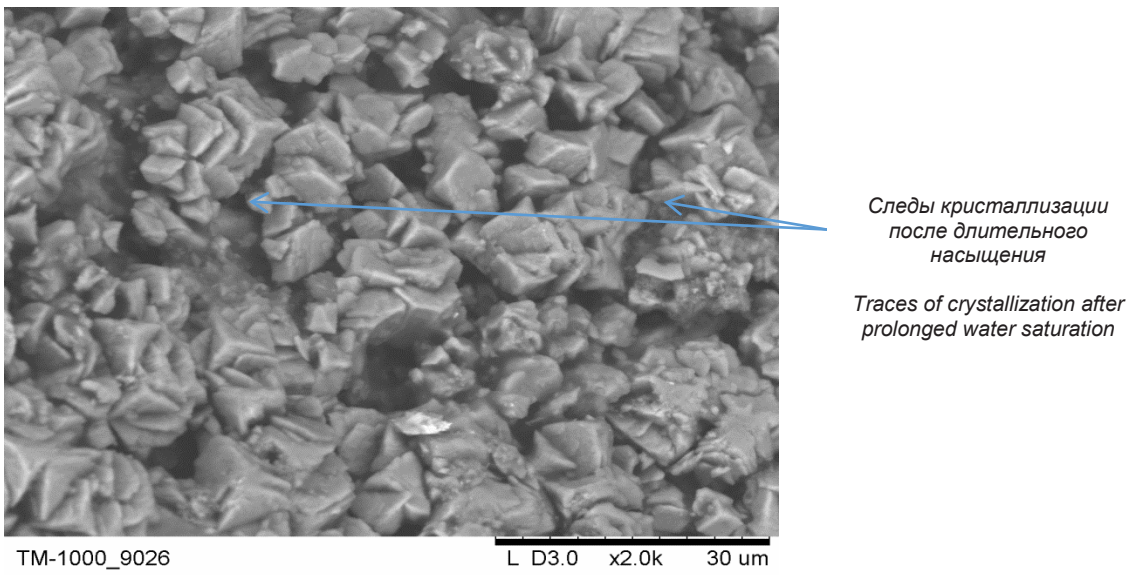


Рисунок 4 – Изменение структуры асфальтовяжущего вещества после длительного насыщения образца водой

Figure 4 – Change in the structure of the asphalt-binding material after prolonged water saturation

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Все вышесказанное свидетельствует о том, что в условиях водонасыщения в исследуемом материале протекают процессы гидратации, которые придают асфальтобетону на шлаковых заполнителях необходимую водостойкость и прочность, увеличивая ее с течением времени по степенной зависимости (1).

Проведенные ХНАДУ (ХАДИ) исследования также показывают, что формирование асфальтобетонных покрытий из шлаковых материалов продолжается длительное время и полученное по окончанию формирования дорожное покрытие соответствует плотности образцов, уплотненных в лабораторных условиях нагрузкой 30 МПа. В процессе эксплуатации покрытий происходит перераспределение пористости — уменьшается объем пор большого диаметра. Такое перераспределение пористости оказывает положительное влияние на повышение морозостойкости шлакоасфальтобетона.[8,9]

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных в ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) г. Новосибирска лабораторных испытаний состава, структуры и свойств металлургических шлаков позволили подобрать составы шлакоасфальтобетонных смесей, соответствующих требованиям ГОСТ 9128–2013[10] (рисунок 5).

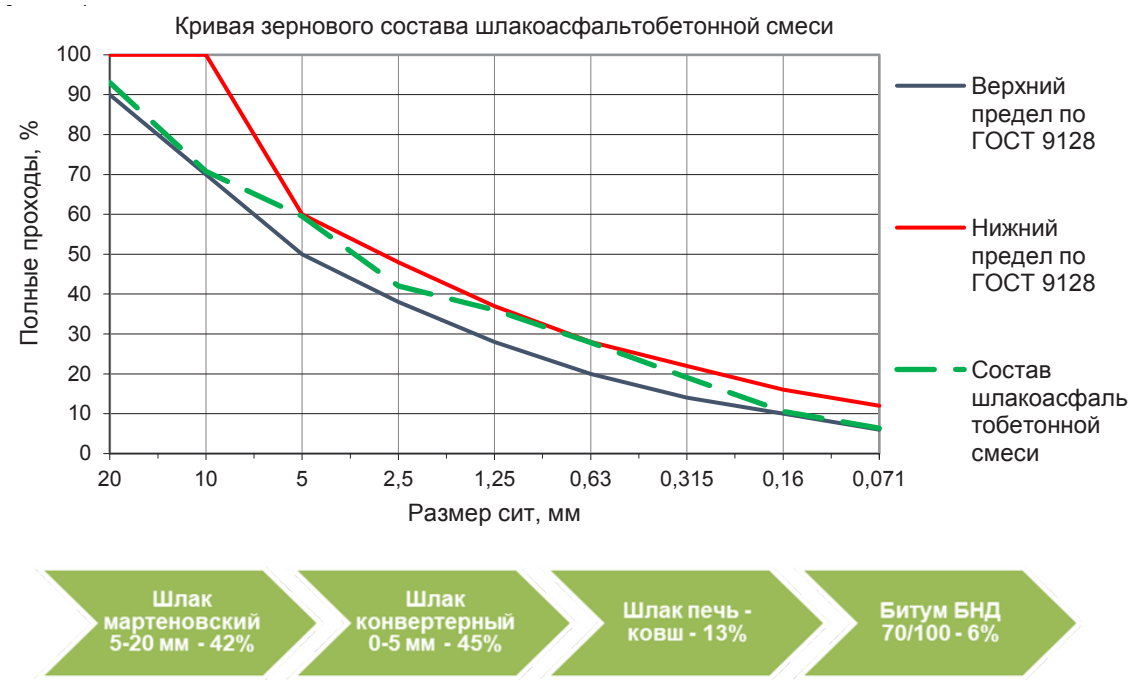


Рисунок 5 – Зерновой состав минеральной части плотной шлакоасфальтобетонной смеси

Figure 5 – Curve of the grain composition of the dense fine-grained slag-asphalt-concrete mixture

[8] Тулаев А.Я., Королев М.В., Исаев В.С., Юмашев В. М. Дорожные одежды с использованием шлаков / под ред. А.Я. Тулаева. М. : Транспорт, 1986, 221 с.

[9] Пименов А.Т., Прибылов В.С. Перспективы использования отходов металлургических производств в составе асфальтобетонных смесей для повышения их эксплуатационных характеристик // Качество. Технологии. Инновации Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 52–56.

[10] ГОСТ9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2013 № 2309-ст: введен впервые: дата введения. 2014-11-01. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Проектирование составов асфальтобетонной смеси осуществлялось с учетом обеспечения максимальной плотности и минимальной пористости минерального остова образцов по предельным кривым ГОСТ 9128–2013. Отличие по величине водонасыщения от шлаковых материалов по ОДМ 218.3.087–2017[11] связано с необходимостью формирования закрытой замкнутой системы пор в образцах органоминеральной смеси с остаточной пористостью, не превышающей 2,5 – 5,0%, для плотных смесей. Для пористых шлаковых асфальтобетонов, предполагаемых для устройства нижних слоев покрытий и оснований, рекомендуется ограничивать данную величину до 8–15%.

В таблице 6 приведены фактические показатели физико-механических свойств шлакоасфальтобетона на примере плотной шлакоасфальтобетонной смеси, соответствующей мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси типа Б марки II по ГОСТ 9128–2013. Анализ полученных результатов показывает, что шлакоасфальтобетонные смеси и шлакоасфальтобетон по основным показателям соответствуют требованиям существующей нормативно-технической базы, а по отдельным показателям, характеризующим эксплуатационную работу материала – прочность при 50^0 С, сдвигоустойчивость и трещиностойкость – превышают их в 1,3 – 1,9 раза.

Таблица 6
Показатели физико-механических свойств шлакоасфальтобетона

Table 6
Indicators of physico-mechanical properties of the slag asphalt concrete

Наименование показателя	Единицы измерения	Плотная шлакоасфальтобетонная смесь	Щебеночная плотная мелкозернистая асфальтобетонная смесь тип Б марка II по ГОСТ 9128–2013
1	2	3	4
Средняя плотность	кг/м^3	2370	Не нормируется
Водонасыщение	%	1,7	1,5-4,0
Предел прочности при сжатии, при температуре 50°С	Па	2,6*10^6	Не менее 2,0*10^6
Предел прочности при сжатии, при температуре 20°С	Па	4,4*10^6	Не менее 2,2*10^6
Предел прочности при сжатии, при температуре 0°С	Па	7,0*10^6	Не менее 12,0*10^6
Водостойкость	-	0,87	Не менее 0,85
Сдвигоустойчивость по: - коэффициенту внутреннего трения	-	0,88	Не менее 0,81
- сцеплению при сдвиге при температуре 50°С	Па	0,66*10^6	Не менее 0,35*10^6
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0°С и скорости деформирования 50 мм/мин	-	2,8	2,5-6,0

[11] ОДМ 218.3.087–2017 Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по применению асфальтобетонных смесей на основе металлургических шлаковых материалов для условий Центрального федерального округа (Распоряжение Росавтодора от 20.04.2017 N744-р).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 7
Сведения по стоимости заполнителей для приготовления асфальтобетонных смесей[12]

Table 7
Cost of aggregates for the preparation of asphalt mixtures

Наименование карьера	Стоимость материала с НДС, руб. за 1 тонну		
	фр. 20–40 мм	фр. 5–20 мм	фр.0–5 мм
Металлургический шлак г. Новокузнецка (Кемеровская область)	364,37	333,26	302,17
Барзасский карьер (Кемеровская область)	380,00	520,00	330,00
Карьер ГДК (Кемеровская область)	432,00	504,00	314,00
Каменный карьер (Новосибирская область)	510,00	600,00	80,00
Искитимский карьер (Новосибирская область)	500,00	600,00	350,00

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что применение металлургических шлаков Новокузнецкого металлургического комбината (Кемеровская область) в качестве заполнителя минерального каркаса асфальтобетонной смеси и шлакоасфальтобетона позволит увеличить его эксплуатационные характеристики и долговечность с одной стороны, что особенно важно в условиях интенсивной транспортной нагрузки и резко континентального климата; с другой стороны позволит сократить себестоимость таких смесей по сравнению с традиционными благодаря применению в них отходов промышленного производства (таблица 7). Металлургические шлаки могут стать сырьевым источником при приготовлении и укладке асфальтобетонных смесей на городских улицах и дорогах различных категорий. Себестоимость и запасы шлаков (по данным [24,25] объем шлаковых отходов металлургического производства в РФ составляет свыше 11 млн тонн в год) позволят строить устойчивые к динамическим нагрузкам и знакопеременным температурам дорожные покрытия при сравнительно меньших материальных затратах. Рассматриваемые авторами шлаковые материалы – заполнители асфальтобетона – не подвержены распаду, с точки зрения воздействия на окружающую природную среду относятся к 4 классу опасности по ГОСТ 12.1.007–76[13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спиридонов Э.С. Проблемы и пути развития дорожного строительства / Э.С. Спиридонов, Д.Э. Волков // Трансп. РФ. 2010. № 4. С. 62–65
2. Бобков А.Л., Бобков Л.В. Инновации и повышение конкурентоспособности промышленности России: монография. М.2010. 150 с.
3. Марьев В.А., Руденский А.В. Использование вторичных материальных ресурсов при строительстве и ремонте автомобильных дорог – важный резерв ресурсосбережения // Дороги и мосты. 2017. № 37/1. С. 11–24.
4. Гриневич Н.А. Металлургические шлаки в дорожном строительстве. Управление инновациями в дорожном хозяйстве // Сборник научных трудов ГИПРОДОРНИИ. 2014. № 5(64). С. 124–129.
5. Юшков В.С., Пугин К.Г. Разработка асфальтобетонной смеси с использованием отходов производства // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 99–104.
6. Пугин К.Г. Использование отходов металлургии в асфальтобетонах // Строительные материалы. 2011. №10. С. 26–27.
7. Расстегаева Г.А. Асфальтобетон с применением отходов шлаковатного и литейного производства // Строительные материалы. 1993. № 1. С. 11–12.
8. Самодуров С.И. О долговечности шлаковых асфальтобетонных покрытий. Ростов на/Д // Межвузовский сборник. 1980. С. 21–31.

[12] Данные о стоимости инертных материалов взяты с официальных сайтов горнодобывающих предприятий и карьероуправлений Кемеровской и Новосибирской областей.

[13] ГОСТ 12.1.007–76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

9. Артемова А.В. Активированный минеральный порошок на основе металлургических шлаков и его роль в асфальтобетоне // Леса России и хозяйство в них. 2009. С. 85–91.

10. Василовская Г.В., Назиров Д.Р. Применение отходов промышленности в качестве минерального порошка в асфальтобетоне // Вестник ИрГТУ. 2013. №10 (81). С. 153–157.

11. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов // Науковедение. Том 8, №1 (2016) doi.org/ 10.15862/47TVN116.

12. Подольский В.П., Расстегаева Г.А., Расстегаева Л.Н. Армированный асфальтобетон с применением активных минеральных отходов и побочных продуктов промышленности // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 9(18). С. 10.

13. Горелышева, Л.А. Теоретические аспекты взаимодействия различных порошкообразных материалов с органическими вяжущими // Пути экономии материальных и энергетических ресурсов при ремонте и реконструкции автомобильных дорог. М., 1989. Вып. 1. С. 29–35.

14. Бархатов В. И., Добровольский И. П., Капкаев Ю. Ш. Отходы производств и потребления – резерв строительных материалов: монография / В. И. Бархатов, И. П. Добровольский, Ю. Ш. Капкаев. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та. 2017. 477 с.

15. Баженов Ю. М. Применение промышленных отходов в производстве строительных материалов / Ю. М. Баженов, П. Ф. Шубёнкин, Л. И. Дворкин. М.: Стройиздат. 1986.

16. Ларионова Н.А., Николаева С.К., Рябова А.А. Оценка возможности использования промышленных отходов для получения строительных материалов для дорожного строительства // Инновационный потенциал естественных наук. 2006. С. 157–162.

17. Кашевская Е.В., Костенко К.К., Костенко А.К. Использование отходов производства и вторичных ресурсов в дорожном строительстве // Наука и техника в дорожной отрасли. 2004. № 2 (29). С. 30–33

18. Хасанова В.К., Шильникова Н.В. Проблема утилизации промышленных отходов в России на современном этапе её развития // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 2. С. 76–78.

19. Сенцов И.В., Ничипорович Е.Д., Спицкая А.Ш., Цыгвинцев И.В., Матирная П.И., Шавва А.А., Новик А.Н., Промышленные отходы и ТБО в дорожном строительстве// Alfabuild. 2018. №3(5). С. 52–65

20. Бессонов А.С. Технологии ресурсосбережения в строительстве и их применение на современном этапе // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 2 [Электронный ресурс]. URL: http://web.snauka.ru/issues/2017/02/78083 (дата обращения: 17.12.2019).

21. Ярмолинская Н.И. Дорожный асфальтобетон с применением минеральных порошков из техногенных отходов промышленности. Хабаровск: Изд-во хабаров. гос. тех. ун-та, 2002. 103 с.

22. Гончарова М. А. Использование конвертерных шлаков в производстве материалов для дорожного строительства // Строит. материалы. 2009. № 7. С. 26–27.

23. Пименов А.Т., Ильина Л.В., Смирнова О.Е. Концептуальные подходы к применению металлургических шлаков при производстве строительных материалов различного назначения Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. Т.1 № 1 (9). С. 179–182.

24. Пименов А.Т., Прибылов В.С. Влияние сталеплавильных шлаков в составе асфальтобетона дорожных покрытий на их свойства в процессе эксплуатации // Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций. 2018. С. 306–309.

25. Пименов А.Т., Прибылов В.С. Модификация составов металлургических шлаков для повышения их гидравлической активности // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 6(21). С. 106–113.

REFERENCES

1. Spiridonov E.S. Problemy i puti razvitiya dorozhnogo stroitel'stva [Problems and ways of development of road construction]/ E.S. Spiridonov, D.E. Volkov // Transp. RF. 2010; 4: 62–65 (in Russian).

2. Bobkov A.L., Bobkov L.V. *Innovatsii i povysheniye konkurentosposobnosti promyshlennosti Rossii* [Innovations and increasing the competitiveness of Russian industr].Monografiya. Moscow, 2010; 150 p. (in Russian).

3. Mar'yev V.A., Rudenskiy A.V. Ispol'zovaniye vtorichnykh material'nykh resursov pri stroitel'stve i remonte avtomobil'nykh dorog – vazhnyy rezerv resursosberezheniya [The use of secondary material resources in the construction and repair of roads is an important reserve of resource conservation]. *Dorogi i mosty*. 2017; 37/1: 11–24 (in Russian).

4. Grinevich N.A. Metallurgicheskiye shlaki v dorozhnom stroitel'stve. Upravleniye innovatsiyami v dorozhnom khozyaystve [Metallurgical slag in road construction. Management of innovations in the road sector]. *Sbornik nauchnykh trudov GIPRODORNII*. 2014; 5(64):124–129 (in Russian).

5. Yushkov V. S., Pugin K. G. Razrabotka asfal'tobetonnoy smesi s ispol'zovaniyem otkhodov proizvodstva [Development of asphalt-concrete mix using production wastes]. *Vestnik MGSU*. 2014; 6: 99–104 (in Russian).

6. Pugin K.G. Ispol'zovaniye otkhodov metallurgii v asfal'tobetonakh [The use of metallurgy waste in asphalt concrete]. *Stroitel'nyye materialy*. 2011; 10 : 26–27 (in Russian).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

7. Rasstegayeva G.A. Asfal'tobeton s primeneniyem otkhodov shlakovatnogo i liteynogo proizvodstva: [Asphalt concrete using slag and foundry waste: Building materials]. *Stroitel'nyye materialy*. 1993; 1: 11–12.

8. Samodurov S.I. O dolgovechnosti shlakovykh asfal'tobetonnykh pokrytiy [On the durability of slag asphalt pavements]. *Mezhvuzovskij sbornik*. Rostov-na-Donu,1980: 21–31 (in Russian).

9. Artemova A.V. Aktivirovannyy mineral'nyy poroshok na osnove metallurgicheskikh shlakov i yego rol' v asfal'tobetone [Activated mineral powder based on metallurgical slag and its role in asphalt concrete]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*. 2009; 85–91 (in Russian).

10. Vasilovskaya G.V., Nazirov D.R. Primeneniye otkhodov promyshlennosti v kachestve mineral'nogo poroshka v asfal'tobetone [Use of industrial waste as a mineral powder in asphalt concrete]. *Vestnik IrGTU*. 2013; 10 (81): 153–157 (in Russian).

11. Kopylov V.Ye., Burenina O.N. Mineral'noye syr'ye Respubliki Sakha (Yakutiya) dlya proizvodstva asfal'tobetonov [Mineral raw materials of the Republic of Sakha (Yakutia) for the production of asphalt concrete]. *Naukovedeniye*. 2016; Tom 8, No. 1. doi.org/10.15862/47TVN116 (in Russian).

12. Podol'skiy V.P., Rasstegayeva G.A., Rasstegayeva L.N. Armirovannyy asfal'tobeton s primeneniyem aktivnykh mineral'nykh otkhodov i pobochnykh produktov promyshlennosti [Reinforced asphalt concrete with the use of active mineral waste and industrial by-products]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2000; 9(18): 10 (in Russian).

13. Gorelysheva, L. A. Teoreticheskiye aspekty vzaimodeystviya razlichnykh poroshkoobraznykh materialov s organicheskimi vyazhushchimi [Theoretical aspects of the interaction of various powder materials with organic binders]. *Puti ekonomii material'nykh i energeticheskikh resursov pri remonte i rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog*. Moscow, 1989; 1: 29–35 (in Russian).

14. Barkhatov V.I., Dobrovol'skiy I.P., Kapkayev Yu.Sh. Otkhody proizvodstv i potrebleniya – rezerv stroitel'nykh materialov [Production and consumption waste – building materials reserve]: monografiya. Chelyabinsk: Izd-vo Chelyab. gos. un-ta, 2017; 477 (in Russian).

15. Bazhenov Yu. M., Shubenkin P.F., Dvorkin L. I. Primeneniye promyshlennykh otkhodov v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Application of industrial waste in the production of building materials]. Moscow, Stroyizdat, 1986 (in Russian).

16. Larionova N.A., Nikolayeva S.K., Ryabova A.A. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya promyshlennykh otkhodov dlya polucheniya stroitel'nykh materialov dlya dorozhnogo stroitel'stva [Assessment of the possibility of using industrial waste to obtain building materials for road construction]. *Innovatsionnyy potentsial yestestvennykh nauk*. 2006; 157–162 (in Russian).

17. Kashevskaya Ye.V., Kostenko K.K., Kostenko A.K. Ispol'zovaniye otkhodov proizvodstva i vtorichnykh resursov v dorozhnom stroitel'stve [Use of industrial waste and secondary resources in road construction]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli.* 2004; 2 (29): 30–33 (in Russian).

18. Khasanova V.K., Shil'nikova N.V. Problema utilizatsii promyshlennykh otkhodov v Rossii na sovremennom etape yeyo razvitiya [Problem of industrial waste disposal in Russia at the present stage of its development]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2012.; 15 (2): 76–78 (in Russian).

19. Sentsov I.V., Nichiporovich Ye.D., Spitskaya A.SH., Tsygvintsev I.V., Matirnaya P.I., Shavva A.A., Novik A.N., Promyshlennyye otkhody i TBO v dorozhnom stroitel'stve [Industrial waste and MSW in road construction].*Alfabuild.* 2018; 3 (5): 52-65 (in Russian).

20. Bessonov A.S. Tekhnologii resursosberezheniya v stroitel'stve i ikh primeneniye na sovremennom etape [Resource-saving technologies in construction and their application at the modern stage]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii.* 2017; 2: URL: http://web.snauka.ru/issues/2017/02/78083 (in Russian).

21. Yarmolinskaya N.I. Dorozhnyy asfal'tobeton s primeneniyem mineral'nykh poroshkov iz tekhnogennykh otkhodov promyshlennosti [Road asphalt using mineral powders from industrial waste]. Khabarovsk: *Izd-vo khabarov. gos. tekh. un-ta*. 2002; 103 p. (in Russian).

22. Goncharova M. A. Ispol'zovaniye konverternykh shlakov v proizvodstve materialov dlya dorozhnogo stroitel'stva [Use of converter slags in the production of materials for road construction]. *Stroit. materialy*. 2009; 7: 26–27 (in Russian).

23. Pimenov A.T., Il'ina L.V., Smirnova O.Ye. Kontseptual'nyye podkhody k primeneniyu metallurgicheskikh shlakov pri proizvodstve stroitel'nykh materialov razlichnogo naznacheniya [Conceptual approaches to the use of metallurgical slag in the production of building materials for various purposes]. *Resursoenergoefektivnyye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona-2018*; 1 (9): 179–182 (in Russian).

24. Pimenov A.T., Pribylov V.S. Vliyaniye staleplavil'nykh shlakov v sostave asfal'tobetona dorozhnykh pokrytiy na ikh svoystva v protsesse ekspluatatsii [Influence of steelmaking slag in the composition of asphalt concrete pavement on their properties during operation]. *Resursosberezheniye i ekologiya stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy*. 2018; 306–309 (in Russian).

25. Pimenov A.T., Pribylov V.S. Modifikatsiya sostavov metallurgicheskikh shlakov dlya povysheniya ikh gidravlicheskoy aktivnosti [Modification of the composition of metallurgical slag to increase their hydraulic activity]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2018; 6(21): 106–113 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пименов А.Т. Участие в обработке и анализе результатов экспериментов. Проверка и корректировка научной статьи.

Прибылов В.С. Выполнение анализа литературных источников и тематических материалов.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Участие в проведении экспериментов, обработка и анализ результатов. Написание и оформление текстового и графического материала для научной статьи. Взаимодействие с испытательными лабораториями.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander T. Pimenov – participation in the processing and analysis of experimental results; checking and updating of the manuscript.

Viacheslav S. Pribylov –analysis of literary sources and thematic materials; participation in experiments; processing and analysis of results; writing and designing of the text and graphic material; cooperation with testing laboratories.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пименов Александр Трофимович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация» ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин), (630008, г. Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113, e-mail: pimenov.alecsandr@yandex.ru).

Прибылов Вячеслав Сергеевич – аспирант кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация» ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин), (630008, г. Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113, e-mail: pribylov_ws@mail.ru).*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander T. Pimenov – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of the Building Materials, Standardization and Certification, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), (630008, Novosibirsk-8, 113, Leningradskaya St., e-mail: pimenov.alecsandr@yandex.ru).

Viacheslav S. Pribylov – Graduate Student, Department of the Building Materials, Standardization and Certification, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), (630008, Novosibirsk-8, 113, Leningradskaya St., e-mail: pribylov_ws@mail.ru).*

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению ***оригинальные научные статьи*** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; ***обзорные статьи*** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет ***ретрагирована*** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (**УДК**) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10–12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте http://translit.ru, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 150 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов − 10–12, количество слов внутри ключевой фразы − не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1−4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Библиографический список (References)

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID,ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 − Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисуночные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1……).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие_требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации − литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректура 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.

Контактная информация:
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org;
Почтовый адрес редакции: 644080, г. Омск, просп. Мира. 5. ФГБОУ ВО «СибАДИ».
Редакция научного рецензируемого журнала Вестник СибАДИ / The Russian Automobile and Highway Industry Journal,
издательско-полиграфический комплекс: 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, д 1.
Тел. (3812) 65-88-30.
Редактор – ответственный секретарь «Вестника СибАДИ» – Куприна Татьяна Васильевна
Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.
Гонорары не выплачиваются.
Все статьи публикуются бесплатно.
Информация о научном рецензируемом журнале Вестник СибАДИ / The Russian Automobile and Highway Industry Journal
размещена на сайте: **http://vestnik.sibadi.org**