

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

Том 16, № 4. 2019. Сквозной номер выпуска – 68
Vol. 16, no. 4. 2019. Continuous issue – 68

Главный редактор **Жигадло А.П.**, д-р пед. наук, канд. техн. наук, доц., член-кор. АН, 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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Щербakov 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. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Перебуд 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. Днепрпетровск, 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, Кыргызская Республика

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

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, Ukraine **Edwin Koźniewski**, Doctor of Science, Professor, Białystok, Poland

Edwin Koźniewski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Białystok, 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

Ваклав 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

Zhirkalbek 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, Plzen, Czech Republic

Vasiliiy 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 цифровые идентификаторы 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 27.08.2019. Дата выхода в свет 30.08.2019. Формат 60×84 %. 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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г.Ю. Зубрилов, В.Г. Мельников, В.А. Зеер, Д.С. Голубцов

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТРЕЛЫ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА ПРИ ОПУСКАНИИ	400
--	-----

О.Ю. Казаков, Г.В. Кустарев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА КАТКА	408
---	-----

М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МОБИЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ. ОПЫТ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ	416
---	-----

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.П. Жигаadlo, С.В. Дорохин, Д.В. Лихачев

НОВЫЙ ПОДХОД К ВВОДУ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛЕВОПОВОРОТНОЙ СЕКЦИИ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	432
---	-----

Н.Ю. Мачехин, И.И. Ширлин, С.В. Пашукевич

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С УВЕЛИЧЕННЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ ЗАМЕНЫ	446
---	-----

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.С. Александров, Т.В. Семенова, Н.П. Александрова

МЕТОД РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОСНОВАНИЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	456
--	-----

К.В. Беляев, И.Л. Чулкова

МОДИФИКАЦИЯ БИТУМА ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ	472
--	-----

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев

ВЫБОР МЕТОДА СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ	486
---	-----

И.Л. Чулкова, И.А. Селиванов, В.Д. Галдина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ СКОПА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ МЕТОДОМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА	504
---	-----

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

G.Yu. Zubrilov, V.G. Melnikov, V.A. Zeer, D.S. Golubtsov

CALCULATION OF THE HYDRAULIC BOOM LIFTING MECHANISM WHILE LOWERING PROCESS	401
--	-----

O.Y. Kazakov, G.V. Kustarev

EXPERIMENTAL STAND AND METHODOLOGY FOR THE ROLLER'S WORKING BODY RESEARCH	409
---	-----

M.N. Artemenko, P.A. Korchagin, I.A. Teterina

DEVELOPMENT TRENDS OF UNMANNED ROBOTIC SYSTEMS: EXPERIENCE OF DOMESTIC AND FOREIGN MANUFACTURERS	417
---	-----

PART II. TRANSPORT

A.P. Zhigadlo, S.V. Dorokhin, D.V. Likhachev

NEW APPROACH TO ADDITIONAL LEFT-TURN SECTIONS OF THE TRAFFIC SIGNAL REGULATION	433
--	-----

N.Y. Machehkhin, I.I. Shirlin, S.V. Pashukevich

USAGE OF HIGH-QUALITY ENGINE OILS WITH EXTENDED REPLACEMENT INTERVALS: FEATURES OF THE EQUIPMENT OPERATION	447
---	-----

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

A.S. Aleksandrov, T.V. Semenova, N.P. Aleksandrova

MATERIALS USED IN THE ROAD BASES: METHOD OF THE RESIDUAL DEFORMATIONS' CALCULATION	457
--	-----

K.V. Belyaev, I. L. Chulkova

CARBON MODIFICATION OF BITUMEN	473
--------------------------------------	-----

I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev

HARDENING CONCRETE IN STRUCTURES: CHOICE OF THE CONSTRUCTION METHOD BASED ON RESULTS OF THE TEMPERATURE REGIME MODELING IN SPECIAL CONDITIONS	487
--	-----

I.L. Chulkova, I. A. Selivanov, V.D. Galdina

INFLUENCE OF THE SCOPE ADDITION ON THE STRUCTURE FORMATION OF THE CEMENT STONE BY THE METHOD OF QUANTITATIVE X-RAY PHASE ANALYSIS	505
--	-----

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

УДК 62-822

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТРЕЛЫ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА ПРИ ОПУСКАНИИ

Г.Ю. Зубрилов, В.Г. Мельников, В.А. Зеер*, Д.С. Голубцов
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия
*zeer.vladimir@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается дроссельное регулирование, обеспечивающее неразрывность потока рабочей жидкости, с целью предотвращения процесса кавитации в гидроприводе грузоподъемного механизма под действием статических и динамических нагрузок с учетом упругих деформаций гидросистемы при опускании стрелы с грузом. Опускание стрелы осуществляется подачей рабочей жидкости в штоковую полость цилиндра насосом постоянной производительности, слив рабочей жидкости – через дроссель одностороннего действия.

Материалы и методы. Для обеспечения неразрывности потока в штоковой полости гидроцилиндра расход рабочей жидкости из поршневой полости должен обеспечить постоянную скорость перемещения поршня независимо от изменения внешней нагрузки. Регулирование скорости опускания стрелы осуществляется изменением эффективного сечения отверстия дросселя при переменном давлении. При решении задачи использовались теории динамики гидроприводов, механизмов и машин, сопротивления материалов и дифференциальных уравнений.

Результаты. Представленная методика позволяет на стадии проектирования определять величину давления рабочей жидкости на входе в дроссель и закономерность ее изменения, а также площадь отверстия дросселя, обеспечивающего неразрывность потока при опускании стрелы, в зависимости от конструктивных особенностей кинематической схемы грузоподъемного механизма, массы опускаемого груза и технологического оборудования, углового ускорения стрелы и модуля упругости элементов гидросистемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузоподъемный механизм, дроссельное регулирование, скорость опускания стрелы, грузоподъемные машины, сжимаемость жидкости, давление в приводе, деформация гидроцилиндра, бескавитационный режим гидропривода, гидропривод грузоподъемного механизма, алгоритм расчета гидропривода.

© Г.Ю. Зубрилов, В.Г. Мельников, В.А. Зеер, Д.С. Голубцов



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

CALCULATION OF THE HYDRAULIC BOOM LIFTING MECHANISM WHILE LOWERING PROCESS

G.Yu. Zubrilov, V.G. Melnikov, V.A. Zeer *, D.S. Golubtsov
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia
*zeer.vladimir@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper considers the throttle regulation providing flow continuity of working fluid for the purpose of cavitations' prevention. The throttle regulation in a hydraulic actuator of the load-lifting mechanism under the influence of static and dynamic loads taking into account elastic deformations of a hydraulic system while the boom lowering with a load is an important process. The boom lowering is carried out by the working fluid supply in a stocked cavity of a cylinder by the pump of constant productivity; draining of working fluid is made through the one-sided action throttle.

Materials and methods. The consumption of working fluid from a piston cavity provided the constant movement speed of the piston without external loading change. Regulation of speed while the boom lowering was carried out by change of effective section of the throttle opening in pressure. The authors used dynamics of hydraulic actuators, mechanisms and machines, resistance of materials and differential equations.

Results. The presented technique allowed determining the value of the working fluid pressure and its change in the throttle. Moreover, this technique determined the area of the throttle providing flow continuity while the boom lowering, depending on design features of the kinematic scheme of the load-lifting mechanism, on the mass of the lowered load and technology equipment, on the angular arrow acceleration and on elastic modulus of hydraulic system elements.

KEYWORD: load-lifting mechanism, throttle regulation, speed of the boom lowering, load-lifting machines, compressibility of liquid, pressure in the drive, hydraulic cylinder deformation, non-cavitations' mode of the hydraulic actuator, hydraulic actuator of the load-lifting mechanism, calculation algorithm of the hydraulic actuator.

© G.Yu. Zubrilov, V.G. Melnikov, V.A. Zeer, D.S. Golubtsov



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

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании гидропривода грузоподъемных машин и механизмов необходимо учитывать возможность возникновения разрыва потока рабочей жидкости в штоковой полости гидроцилиндра при опускании стрелы с грузом. Быстрое опускание рабочего органа приводит к выделению растворенных газов из рабочей жидкости, возникновению кавитации. Исследования объемной прочности минеральных масел показали, что понижение давления до $-0,06 \dots -0,015$ МПа при температуре масла $45 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к разрыву потока рабочей жидкости с выделением из нее паров и растворенных в ней газов¹ [1, 2]. При разрыве потока происходит резкое изменение объема жидкости, сильно меняется ее упругость, что приводит к нарушению устойчивого режима работы гидропривода.

При опускании стрелы необходимо обеспечить неразрывность потока рабочей жидкости в штоковой полости гидроцилиндра (рисунок). Это достигается установкой дросселя на выходе из поршневой полости гидроцилиндра. При постоянной подаче насоса Q_n скорость поршня гидроцилиндра V_n должна быть постоянной, при этом условии обеспечивается неразрывность потока^{2,3,4} [3].

Скорость поршня, м/с:

$$v_n = \frac{Q_n}{S_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ш}}$ – площадь штоковой полости гидроцилиндра, м^2 ;

Q_n – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

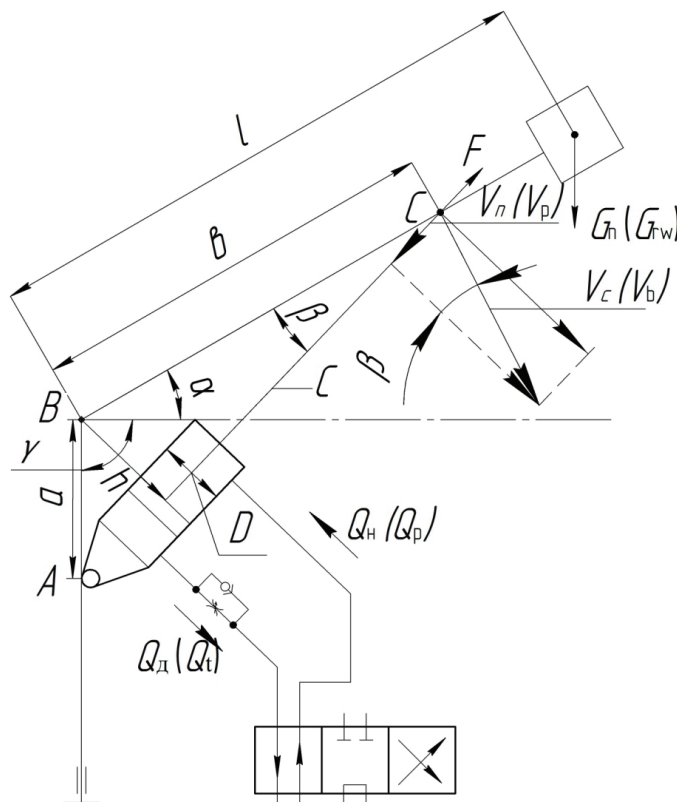


Рисунок – Расчетная схема опускания стрелы грузоподъемного механизма
Figure – Calculation scheme of the boom lowering lifting mechanism

¹ Хохлов В. А. Гидравлические усилители мощности. М. : Наука, 1966. 422 с.

² Башта Т.М. [и др.] Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.], 4-е изд., стереотипное, перепечатка со второго издания 1982 г. М. : Альянс, 2010. 423 с.

³ Гидравлика и гидропневмопривод. Гидравлические машины и гидропневмопривод : учебник / А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин, А.А. Шейпак. 6-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2017. 446 с.

⁴ Попов Д.Н., Панаиотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика / под ред. Д.Н. Попова. М. : Изд-во МГТУ им Баумана Н.Э., 2014. 317 с.

Расход рабочей жидкости из поршневой полости гидроцилиндра через дроссель определяется из выражения, м³/с:

$$Q_d = Q_n \cdot \psi, \quad (2)$$

где ψ отношение площадей гидроцилиндра, ед.

$$\psi = \frac{S_n}{S_{ш}}, \quad (3)$$

где S_n площадь поршневой полости гидроцилиндра, м².

Расход рабочей жидкости через дроссель определяется [4, 5, 6] из выражения, м³/с:

$$Q_d = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}, \quad (4)$$

где ΔP разность давлений на входе в дроссель и выходе из него, Па;

ρ – плотность жидкости, м³/кг;

μ – коэффициент расхода, зависящий от конструкции дросселя, числа Рейнольдса, формы и размеров отверстия;

f – площадь отверстия дросселя, м².

Выражение (4) с учетом (2):

$$Q_n \cdot \psi = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}. \quad (5)$$

Ввиду относительно небольшой величины давления на выходе, в дальнейших расчетах его можно не учитывать, тогда

$$Q_n \cdot \psi = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} P}, \quad (6)$$

где давление на входе в дроссель, это же давление и в поршневой полости гидроцилиндра, так как дроссель устанавливается на выходе из гидроцилиндра, Па.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для нахождения площади отверстия дросселя необходимо определить давление. Для этого составим уравнение динамического равновесия^{5,6} [7, 8]:

$$G_n \cdot l \cdot \cos \alpha - F \cdot h = J_n \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_n}{d\alpha}, \quad (7)$$

где G_n – приведенный вес технологического оборудования к центру масс опускаемого груза, Н;

J_n – приведенный момент инерции к оси вращения стрелы, кг, м²;

l – расстояние от центра масс груза до оси вращения стрелы, м;

ω – угловая скорость стрелы, с⁻¹;

F – усилие гидроцилиндра, Н;

h – плечо усилия F , м.

Ввиду малого значения второго слагаемого правой части уравнения (7) можно записать его в следующем виде:

$$G_n \cdot l \cdot \cos \alpha - F \cdot h = J_n \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Угол α находим из кинематической схемы механизма для максимальной и минимальной длин гидроцилиндра и нескольких промежуточных положений. Для этих же положений из треугольника ABC (рисунок) по трем сторонам находим угол β .

Величина плеча h определяется из выражения, м:

$$h = b \cdot \sin \beta, \quad (9)$$

где b – расстояние от шарнирного соединения стрелы с основанием до соединения со штоком гидроцилиндра, м.

Определим угловую скорость ω стрелы, с⁻¹:

$$\omega = \frac{v_c}{b}, \quad (10)$$

где v_c – линейная скорость стрелы в точке С, м/с.

Из плана скоростей (рисунок) линейная скорость стрелы, м/с:

$$v_c = \frac{v_n}{\sin \beta}, \quad (11)$$

где v_n – скорость поршня гидроцилиндра, м/с.

В выражении (10) произведем замену v_c из уравнения (11), м/с:

$$\omega = \frac{v_n}{b \cdot \sin \beta}. \quad (12)$$

Усилие гидроцилиндра F равно, Н:

$$F = P \frac{\pi D^2}{4}, \quad (13)$$

⁵ Артоблевский И.И. Теория механизмов и машин : учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988. 640 с.

⁶ Журавлев В.Ф. Основы технической механики : изд. 2-е, перераб. М. : Изд-во физико-математической литературы, 2001. 320 с.

где P – давление в поршневой полости гидроцилиндра, равное давлению на входе в дроссель, Па; D – диаметр гидроцилиндра, м.

Под действием давления в поршневой полости гидроцилиндра происходит деформация рабочей жидкости и гильзы цилиндра, поэтому первоначальный объём Q уменьшается на величину ΔQ ^{7,8}. Изменение объёма ΔQ за время dt определяется из выражения, м³/с:

$$\frac{d(\Delta Q)}{dt} = \frac{Q}{E_r} \cdot \frac{dP}{dt}, \quad (14)$$

где E_r – приведенный модуль упругости, Па.

В выражении (14) заменим

$$\frac{Q}{E_r} = K^v, \quad (15)$$

где K^v – коэффициент пропорциональности, учитывающий зависимость изменения объёма рабочей жидкости от давления, тогда

$$\frac{d(\Delta Q)}{dt} = K^v \frac{dP}{dt}. \quad (16)$$

Угловая скорость, с учетом деформации рабочей жидкости и гильзы гидроцилиндра, с⁻¹:

$$\omega = \frac{4 \cdot K^v \cdot \frac{dP}{dt}}{b \cdot \sin \beta \cdot \pi D^2}. \quad (17)$$

Заменим

$$C = \frac{4 \cdot K^v}{\pi D^2}. \quad (18)$$

Тогда

$$\omega = \frac{v_n}{b \cdot \sin \beta} + C \cdot \frac{1}{b \cdot \sin \beta} \cdot \frac{dP}{dt}. \quad (19)$$

Из уравнения (8) с учётом значения F (13) находим давление P , Па:

$$P = \frac{4 \cdot G_n \cdot l \cdot \cos \alpha}{\pi D^2 \cdot h} - \frac{4 \cdot J_n}{\pi D^2 \cdot h} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (20)$$

В уравнении (20) произведем замену постоянных величин:

$$A = \frac{4 \cdot G_n \cdot l}{\pi D^2}, \quad (21)$$

$$B = \frac{4 \cdot J_n}{\pi D^2}, \quad (22)$$

тогда

$$P = A \cdot \frac{\cos \alpha}{h} - B \cdot \frac{1}{h} \frac{d\omega}{dt}. \quad (23)$$

Подставим (9) в (23):

$$P = \frac{1}{b \cdot \sin \beta} \left(A \cdot \cos \alpha - B \cdot \frac{d\omega}{dt} \right). \quad (24)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Процесс изменения давления P при опускании стрелы с грузом описывается системой уравнений

$$\begin{cases} P = \frac{1}{b \cdot \sin \beta} \left(A \cdot \cos \alpha - B \cdot \frac{d\omega}{dt} \right) \\ \omega = \frac{v_n}{b \cdot \sin \beta} + C \cdot \frac{1}{b \cdot \sin \beta} \frac{dP}{dt} \end{cases}. \quad (25)$$

Решив систему уравнений (25), можно найти необходимое давление и, соответственно, отверстие дросселя при заданных параметрах стрелы, гидроцилиндра и скорости опускания груза с учетом деформации рабочей жидкости и гидроцилиндра, что позволит опускать груз без «рывков».

Рассмотрим треугольник ABC, стороны AB и BC постоянной длины, сторона AC – переменной длины, зависящей от t , т.е. перемещение точки C, м:

$$AC = \int V_n dt = \int \frac{dS}{dt} dt = S(t), \quad (26)$$

где $S(t)$ – перемещение штока гидроцилиндра во времени, м.

Угол $\beta = \beta(t)$. По теореме косинусов

$$\cos \beta(t) = \frac{b^2 + S^2(t) - a^2}{2 b \cdot S(t)}, \quad (27)$$

$$\sin \beta(t) = \sqrt{1 - \cos^2 \beta}, \quad (28)$$

$$\beta(t) = \arccos \left(\frac{b^2 + S^2(t) - a^2}{2 b \cdot S(t)} \right). \quad (29)$$

Угол α по теореме синусов находится

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{S \cdot \sin \beta}{a} \right)^\gamma, \quad (30)$$

где γ – угол наклона основания стрелы отно-

⁷ Прокофьев В.Н. Влияние деформации жидкости на динамическую характеристику гидропривода. М. : Машиностроение, 1973. 265 с.

⁸ Гавриленко Б.А., Минин В.А., Рождественский С.Н. Гидравлический привод. М. : Машиностроение, 1969. 502 с.

сительно вертикали, в случае если точка качания стрелы В находится на одной вертикали с нижней точкой крепления гидроцилиндра А ($\gamma=90^\circ$, как показано на рисунке), то $\alpha = \arccos(\frac{S \cdot \sin \beta}{a})$.

Из системы (25) выразим $P(t)$, для этого второе уравнение системы продифференцируем по t и подставим в первое^{9,10,11} [9]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{V_n \cdot \cos \beta}{b \cdot \sin^2 \beta} \cdot \frac{d\beta}{dt} - \frac{C \cdot \cos \beta}{b \cdot \sin^2 \beta} \cdot \frac{d\beta}{dt} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{C}{b \cdot \sin \beta} \cdot \frac{d^2 P}{dt^2}, \quad (31)$$

обозначим

$$\frac{C}{b \cdot \sin \beta} = M(t), \quad (32)$$

$$\frac{C \cdot \cos \beta}{b \cdot \sin^2 \beta} \cdot \frac{d\beta}{dt} = N(t), \quad (33)$$

$$\frac{V_n \cdot \cos \beta}{b \cdot \sin^2 \beta} \cdot \frac{d\beta}{dt} = R(t), \quad (34)$$

получаем

$$\frac{d\omega}{dt} = M(t) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2} + N(t) \cdot \frac{dP}{dt} + R(t). \quad (35)$$

Первое уравнение системы (25) преобразуем в вид

$$P = \frac{A \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sin \beta} - \frac{B}{b \cdot \sin \beta} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (36)$$

обозначим

$$\frac{A \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sin \beta} = K(t), \quad (37)$$

$$-\frac{B}{b \cdot \sin \beta} = L(t), \quad (38)$$

получим

$$P = L(t) \cdot \frac{d\omega}{dt} + K(t). \quad (39)$$

В уравнение (39) подставляем уравнение (35):

$$P = L(t) \cdot \left(M(t) \frac{d^2 P}{dt^2} + N(t) \frac{dP}{dt} + R(t) \right) + K(t), \quad (40)$$

раскроем скобки:

$$P = L(t) \cdot M(t) \frac{d^2 P}{dt^2} + L(t) \cdot N(t) \frac{dP}{dt} + L(t) \cdot R(t) + K(t), \quad (41)$$

обозначим

$$-L(t) \cdot M(t) = A_*(t), \quad (42)$$

$$-L(t) \cdot N(t) = B_*(t), \quad (43)$$

$$L(t) \cdot R(t) + K(t) = C_*(t). \quad (44)$$

Получаем неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$A_*(t) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2} + B_*(t) \cdot \frac{dP}{dt} + P = C_*(t). \quad (45)$$

При решении полученного уравнения требуются условия (начальные, краевые), исходя из конструктивных параметров рассчитываемого грузоподъемного механизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный алгоритм позволяет на стадии проектирования гидропривода грузоподъемного механизма при его опускании с грузом определить изменение давления рабочей жидкости на входе в дроссель и на основании изменения давления произвести расчет регулируемого дросселя, обеспечивающего неразрывность потока жидкости и, как следствие, бескавитационный режим работы гидропривода, что положительно сказывается на эксплуатационных параметрах машины в целом [10]. Расчет бескавитационного режима работы гидропривода произведен с учетом углового ускорения стрелы и деформации рабочей жидкости и стенки гильзы гидроцилиндра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В.С. Исследование потоков жидкости в дроссельных каналах при возникновении кавитации // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11, № 1. С. 57–62.

⁹ Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Пер. с нем. 4-е изд., испр. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. 576 с.

¹⁰ Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 1 / Г.М. Фихтенгольц. М.: Книга по требованию, 2013. 608 с.

¹¹ Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. 4 изд. М.: Наука, 1974. 331 с.

2. Hibbeler R.C. Fluid Mechanics. Part 2. Pearson Puntke Hall, 2015. 904 p.

3. Кожухова А.В. Сравнительный анализ способов регулирования скорости движения выходного звена объёмного гидропривода // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 3. № 6. С. 81–84.

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

5. Кузнецов В.С., Шабловский А.С., Яроц В.В. Влияние фаски на входной кромке отверстия в цилиндрической насадке на его коэффициент расхода // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 5. С. 46–52.

6. Зубрилов Г.Ю., Мельников В.Г. Дроссельное регулирование скорости опускания стрелы гидроподъёмного механизма // Строительные и дорожные машины. 2015. №7. С. 32–34.

7. Гурский А.П., Журбин В.Г. Математическая модель механизма подъема рабочего оборудования с параллелограмной навеской // Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнева. Решетневские чтения: механика специальных систем. 2014, С. 233–234.

8. Хахалин М.Н., Журбин В.Г. Динамический анализ гидромеханического привода // Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева. Решетневские чтения: механика специальных систем. 2014. С. 317–318.

9. Галочкин А.И. О некоторых арифметических свойствах коэффициентов функции Куммера // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. №6. С. 27–32.

10. Минин В.В. Моделирование эксплуатационных параметров малогабаритных погрузчиков // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. №2. С. 20–23.

REFERENCES

1. Kuznecov V.S. Issledovanie potokov zhidkosti v drossel'nyh kanalah pri vozniknovenii kavitacii [Research of fluid flows in throttle channels at cavitation emergence] *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2011; T. 11, 1: 57–62 (in Russian).

2. Hibbeler R.C. Fluid Mechanics. Part 2. Pearson Puntke Hall, 2015. 904 p.

3. Kozhuhova A.V. Sravnitel'nyj analiz sposobov regulirovanija skorosti dvizhenija vyhodnogo zvena ob'omnogo gidroprivoda [Contrastive analysis of the motion speed regulation

of an output link in a volume hydraulic actuator]. *Uspehi sovremennoj nauki i obrazovanija*. 2016; T. 3. 6: 81–84 (in Russian).

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

5. Kuznecov V.S., SHablovskij A.S., JAroc V.V. Vlijanie faski na vhodnoj kromke otverstija v cilindricheskoj nasadke na ego koeficient rashoda [Influence of a facet on an entrance edge in a cylindrical nozzle and on its expense]. *Vestnik MGTU im. N.IE. Baumana. Ser. Mashinostroyenie*. 2014; 5: 46–52 (in Russian).

6. Zubrilov G.JU., Mel'nikov V.G. Drossel'noe regulirovanie skorosti opuskanija strely gidropod'emnogo mehanizma [Throttle regulation of the boom lowering speed of the hydrolifting gear]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2015; 7: 32–34 (in Russian).

7. Gurskij A.P., Zhurbin V.G. Matematicheskaja model' mehanizma pod'ema rabochego oborudovanija s parallelogramnoj naveskoj [Mathematical model of the mechanism of the operating equipment raising with a parallelogramny hinge plate]. *Sibirskij gosudarstvennyj azerokosmicheskij universitet im. Akademika M. F. Reshetneva. Reshetnevskie chtenija: mehanika special'nyh sistem*. 2014: 233–234 (in Russian).

8. Hahalin M.N., ZHurbin V.G. Dinamicheskij analiz gidromechanicheskogo privoda [Dynamic analysis of the hydromechanical drive]. *Sibirskij gosudarstvennyj azerokosmicheskij universitet im. Akademika M.F. Reshetneva. Reshetnevskie chtenija: mehanika special'nyh sistem*. 2014: 317–318 (in Russian).

9. Galochkin A.I. O nekotoryh arifmeticheskikh svojstvah koeficientov funkicii Kummera [About some arithmetic properties of Kummer coefficients]. *Fundamental'naja i prikladnaja matematika*. 2005; T. 11. 6: 27–32 (in Russian).

10. Minin V.V. Modelirovanie jekspluatacionnyh parametrov malogabaritnyh pogruzchikov [Modeling of operational parameters of small-size loaders]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2010; T. 316. 2: 20–23 (in Russian).

Поступила 10.04.2019, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорий Юрьевич Зубрилов – ст. преподаватель кафедры технологических машин и оборудования Сибирского федерального университета, (г. Красноярск, ул. Киренского, 26а, e-mail: gsro@yandex.ru).

Вениамин Георгиевич Мельников – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры технологических машин и оборудования Сибирского федерального университета, (г. Красноярск, ул. Киренского, 26 а).

Владимир Андреевич Зеер – канд. техн. наук, доц. кафедры транспортных и технологических машин Сибирского федерального университета, ORCID 0000-0003-3080-4256 (г. Красноярск, ул. Борисова, 20, e-mail: zeer.vladimir@mail.ru).

Даниил Сергеевич Голубцов – студент Сибирского федерального университета, (г. Красноярск, пр. Свободный, 79).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryi Yu. Zubrilov – Associate Professor of the Technological Machines and Equipment Department, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, 26A Kirenskogo St., e-mail: gsro@yandex.ru).

Veniamin G. Mel'nikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technological Machines and Equipment Department, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, 26A Kirenskogo St., phone: 8-908-010-7364).

Vladimir A. Zeer – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technological Machines and Equipment Department, Siberian Federal University, ORCID ID: 0000-0003-3080-4256 (Krasnoyarsk, 20 Borisova St., e-mail: zeer.vladimir@mail.ru).

Daniil S. Golubtsov – Student, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, 79 Svobodny Ave.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Зубрилов Г.Ю. – 40%

Мельников В.Г. – 30%

Зеер В.А. – 20% идея и ее техническая реализация.

Голубцов Д.С. – 10% оформление статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Grigoryi Yu. Zubrilov – 40%

Veniamin G. Mel'nikov – 30%

Vladimir A. Zeer – 20%, idea and its technical implementation

Daniil S. Golubtsov – 10%, design of the article

УДК 625.084

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА КАТКА

*О.Ю. Казаков¹, Г.В. Кустарев²

¹Машиностроительный завод «БЕЦЕМА»,
г. Красногорск, Российская Федерация;

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Российская Федерация

* 4informatika@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье описано направление исследования в области устройства покрытий с помощью катка. Изучена текущая ситуация в сфере применения асфальтобетона как дорожного покрытия, а также дан краткий экскурс в историю материала. Выявлены предпосылки, обосновывающие необходимость в создании рекомендаций, схемы и методики экспериментального изучения рабочего органа и материала в лабораторных условиях различного характера. Целью работы является создание принципиальной схемы стенда и методики для экспериментальных исследований рабочего органа катка в лабораторных условиях.

Материалы и методы. В статье описан лабораторный стенд для экспериментов в области рабочего оборудования катка. Рассмотрена конструкция, состоящая из основания, короба жесткости, направляющих и подвижной части с каркасом и подвешенным над ёмкостью для уплотняемого материала оборудованием.

Результаты. Дана подробная методика проведения экспериментов и рекомендации по её преобразованию под иные исследования в рассматриваемой области. В статье представлены все необходимые данные для проектирования, конструирования стенда и проведения экспериментов с рабочим оборудованием катка.

Обсуждение и заключение. Исследователи, особенно начинающие и обладающие небольшим финансированием, получили дополнительный инструмент в изучении зависимостей и явлений, возникающих во время уплотнения катком материала. Создана схема для исследования рабочего органа катка для условий как маленьких помещений, так и обширных лабораторий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальт, асфальтобетонное покрытие, эксперимент, методика, испытания, каток, рабочий орган, валец, конструирование, уплотнение.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаю признательность за помощь в подготовке данной статьи моему научному руководителю. Кроме того, благодарю научного руководителя по дипломной работе за обучение в области постройки экспериментальных стендов. Отдельно благодарю за нелегкий труд и экспертное мнение анонимных рецензентов, работавших с данной статьёй.

© О.Ю. Казаков, Г.В. Кустарев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL STAND AND METHODOLOGY FOR THE ROLLER'S WORKING BODY RESEARCH

*O.Y. Kazakov¹, G.V. Kustarev²

¹"BECEMA" Machinery Factory,
Krasnogorsk, Russia;

²Moscow State Automobile and Highway Technical University,
Moscow, Russia

* 4informatika@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper researches the sphere of paving with a roller. The authors describe the current situation in the asphalt concrete's application as a road surface. Moreover, the authors conduct the excursion into the history of material. The paper presents the preconditions that justify the need for creating recommendations, schemes and methods for experimental study of the working body and material under laboratory conditions of various kinds. The aim of the study is to create the stand concept and methods for experimental research of the roller's working body in the laboratory.

Materials and methods. The paper described a laboratory stand for experiments in the sphere of roller's working equipment. The authors demonstrated the construction made of a base, a stiffener box, guides and a movable part with a frame and equipment, suspended above the compacted material's container.

Results. As a result, the authors presented the detailed methodology for conducting experiments and recommendations for its transformation in the considered sphere. The paper showed all the necessary data for the design, construction of the test bench and experiments with the roller's working equipment.

Discussion and conclusions. Researchers, especially beginners, receive an additional tool for study of dependencies and phenomena that occur during compaction of material by the roller. Therefore, the authors develops the scheme for the research of the roller's working body in small area conditions and in extensive laboratories.

KEYWORDS: asphalt, asphalt concrete pavement, experiment, method, testing, roller, working equipment, drum, construction, sealing.

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their gratitude to research supervisor for the help in the manuscript's preparing. Moreover, the authors thank the diploma supervisor for training in the experimental stands' construction. Special thanks to the anonymous reviewers for their expert opinion.

© O.Y. Kazakov, G.V. Kustarev



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

ВВЕДЕНИЕ

По всему миру прокладываются сотни тысяч километров автомобильных дорог, возводятся новые строительные площадки. В России асфальт был использован впервые в Санкт-Петербурге в начале XIX века [1]. Асфальтобетон – композитный материал с разносторонними требованиями к составляющим компонентам. Асфальтобетон зарекомендовал себя как надёжный материал для дорожного полотна [2].

Каток как уплотняющая различные вещества и смеси машина применяется в разных сферах строительства – от устройства фундаментов зданий до создания дорожных покрытий из асфальтобетона. Происходит их постоянная модернизация производителями для улучшения процесса уплотнения веществ [3, 4]. Катки являются важным инструментом повышения качества дорог. Это подтверждает поддержка отрасли государством [5]. Катки различаются по многим параметрам и по конкретному назначению – одни уплотняют грунт, другие дорожное покрытие.

Уплотнение представляет собой сближение частиц вещества¹, устранение пористости и повышение прочности и жёсткости полученного результата в целом². Одним из важнейших физико-механических свойств асфальтобетона является его прочность на сжатие. На это во многом влияет степень воздействия со стороны катка в виде коэффициента уплотнения. Рабочий орган катка в виде вальцов и колес оказывает давление на уплотняемое вещество. Различия конструкций весьма существенны и варьируются от воздействия на уплотняемый материал до способа передвижения катка и количества осей. Правильный выбор машины для уплотнения и тип уплотнения (статическое, вибрационное или комбинированное) составляет основу успеха проекта³.

Существует и ряд проблем – на практике дорожное покрытие в нагруженных местах служит меньше положенного срока из-за возникающих дефектов [6]. Среди важных причин появления дефектов можно выделить неправильный состав асфальтобетонной смеси [7]. Частая необходимость в ремонте дорог побуждает к дальнейшему исследованию устойчивых к подобному составу смесей асфальтобетона [8].

Тема уплотняющей техники актуальна, это подтверждает большое количество научных исследований. Особое внимание следует уделить работам специалистов кафедры ЭСМиК СибАДИ. Это известная во всем мире научная школа под руководством профессора В.Б. Пермякова, работающая в области уплотнения дорожных материалов и создания конструкций дорожных катков [9, 10, 11]. В настоящее время в Российской Федерации ведётся активная работа по улучшению качества дорог⁴, использованию усовершенствованных методов переработки асфальта⁵, сокращению сроков укладки покрытия⁶, развитию средств безопасности для персонала⁷, изучению влияния тяжёлых транспортных средств на дорожное полотно. Увеличивается количество методов оценки качества готового покрытия с целью упреждения будущих дефектов [12]. Разработаны новые методы получения экспериментальных образцов смеси [13].

Целью описываемой в статье работы является создание принципиальной схемы стенда для экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Процесс воздействия рабочего органа (например, вальца) на уплотняемый материал необходимо изучать подробнее в связи с постоянно повышающимися требованиями к качеству покрытия [14].

Был решен ряд задач, таких как обеспечение принципиальной схемой устойчивости в

¹ Полосин М.Д., Ронинсон Э.Г. Машинист катка самоходного и полуприцепного на пневматических шинах : учебное пособие. М. : Издательский центр «Академия», 2008. 64 с.

² Дьяков И.Ф. Строительные и дорожные машины и основы автоматизации : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2007. 523 с.

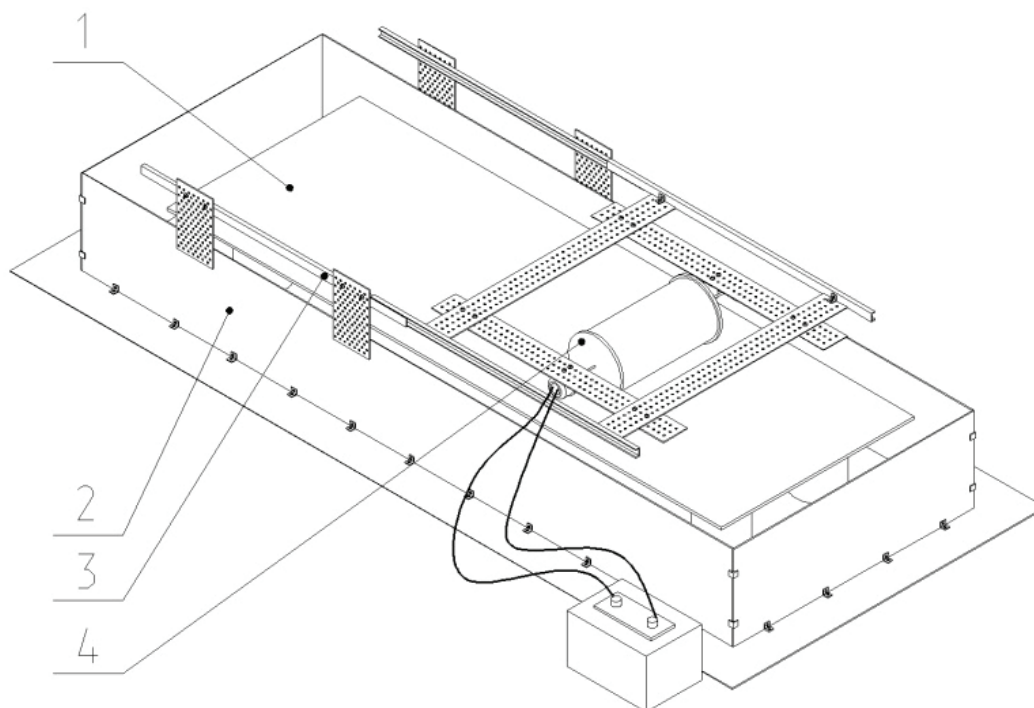
³ Зубков А.Ф. Технология укладки асфальтобетонных смесей при строительстве многополосных дорожных покрытий : учебное пособие. Тамбов : Изд-во ФГБОУВО «ТГТУ», 2016. 81 с.

⁴ First reaction. URL: <https://www.roadsbridges.com/first-reaction> (дата обращения: 25.03.2019).

⁵ Evaluation of cracking resistance and durability of 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. URL: <https://www.omicsonline.org/proceedings/evaluation-of-cracking-resistance-and-durability-of-100-reclaimed-asphalt-pavement-mixtures-48447.html> (дата обращения: 08.03.2019).

⁶ Aged to perfection. URL: <https://www.roadsbridges.com/aged-perfection> (дата обращения: 1.04.2019).

⁷ Beyond compliance. URL: <https://www.roadsbridges.com/beyond-compliance> (дата обращения: 11.06.2019).



*Рисунок 1 – Общий вид стенда:
1 – ёмкость для уплотняемого образца вещества; 2 – дно и короб стенда;
3 – подвижная конструкция стенда; 4 – рабочий орган*

*Figure 1 – General view of the stand:
1 – container for compacted sample; 2 – bottom and stand box;
3 – movable stand construction; 4 – working body*

процессе экспериментов; наличие достаточного пространства для размещения уплотняемого образца вещества; возможность регулирования положения ёмкости для материала по трем осям; возможность перемещения рабочего органа катка вдоль уплотняемого образца; наличие привода рабочего органа; максимальная универсальность стенда для испытания различного оборудования; доступные компоненты и простая сборка.

В статье используется новейшая отечественная и иностранная литература, изучены взгляды специалистов в области устройства дорожного полотна и уплотнения грунтов в целом.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА

Стенд состоит из нескольких сборочных единиц (рисунок 1). Основание и короб обеспечивают устойчивость и жесткость. На основании размещается ёмкость для уплотняемого материала. Рабочий орган уплотняет вещество и перемещается с помощью подвижной конструкции вручную или лебедкой.

На стенде возможно выявление различных

параметров и зависимостей, а также наблюдение процессов, происходящих с веществом во время и после уплотнения (образование волны перед вальцом и прочее). При испытаниях новых методик или рабочих органов возможна оценка коэффициента уплотнения и количества дефектов, а также испытания новых материалов, оценка их эффективности. Конструкция и методика испытаний позволяют в подробностях наблюдать все шаги и результаты уплотнения. Универсальность конструкции позволяет подключать дополнительное измерительное оборудование и вносить изменения (например, прозрачные стенки короба).

Дно и короб (рисунок 2) являются основанием стенда. Короб – жёсткий прочный прямоугольный корпус, предназначенный для установки направляющих подвижной части. Дно стенда – панель, служащая опорой для короба. Данные сборочные единицы жёстко соединены между собой и образуют рабочее пространство для размещения ёмкостей с уплотняемым веществом. Габаритные размеры конструкции могут изменяться под условия конкретных экспериментов.



Рисунок 2 – Дно и короб станда:
1 – торцевая стенка короба; 2 – дно;
3 – боковая стенка короба

Figure 2 – Bottom and stand box:
1 – end wall of the box; 2 – bottom;
3 – side wall of the box

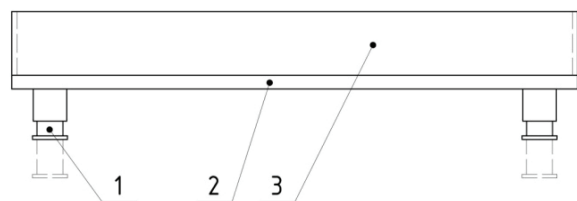


Рисунок 3 – Ёмкость для уплотняемого образца
вещества: 1 – регулируемая опора;
2 – дно ёмкости; 3 – борт ёмкости

Figure 3 – Container for compacted sample: 1 – adjustable support;
2 – bottom of the tank; 3 – tank side

Ёмкость (рисунок 3) предназначена для размещения уплотняемого вещества. Она конструируется с учетом требований к прочности, теплоизоляции и конструктивным параметрам. Ёмкость имеет регулируемые по высоте опоры для позиционирования уплотняемого материала на нужной высоте. Габаритные размеры выбираются таким образом, чтобы ширина и длина ёмкости были меньше внутренних габаритов короба жёсткости.

Подвижная часть станда (рисунок 4) – конструкция, состоящая из боковых планок, жёстко соединённых поперечинами. На этой платформе крепятся кронштейны для рабочего органа (например, вальца) на необходимом расстоянии друг от друга. Задача данной сборочной единицы состоит в симуляции движения катка как подвижной платформы по уплотняемой зоне. Расстояние, которое способно покрыть подвижная часть (дальность вылета конструкции по отношению к неподвижной части станда), ограничено особенностями направляющих, а именно ограничителями.

Рабочий орган (рисунок 5) состоит из вальца с осью вращения, соединённой гибкой муфтой со штоком мотора. Другой конец вала удерживается пластиной с подшипником.

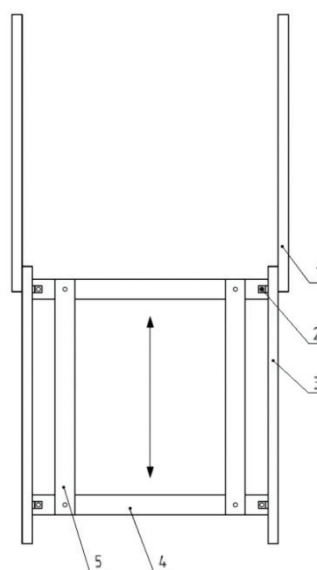


Рисунок 4 – Подвижная конструкция станда:
1 – неподвижная направляющая; 2 – задняя поперечина;
3 – подвижная направляющая; 4 – передняя поперечина;
5 – продольные полосы для крепления рабочего органа

Figure 4 – Movable stand construction: 1 – fixed guide;
2 – rear cross member; 3 – movable guide; 4 – front cross member;
5 – longitudinal strips for the working body's mounting

Перечисленные элементы крепятся на раму жёсткости, перемещающуюся с помощью подвижной конструкции станда. С помощью привода в виде электромотора валец может действовать как ведущий. При необходимости изучения ведомого вальца подвижная конструкция перемещается с выключенным приводом.

Для предотвращения поломки механизма и конструкции экспериментального станда в целом предусмотрена система безопасности (рисунок 6). В случае если валец заклинит или при иной внештатной ситуации гибкая муфта, рассчитанная на определённый момент вращения штока мотора, выйдет из зацепления с валом рабочего органа и не позволит приводу разрушить конструкцию.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика проведения исследований взаимодействия рабочего органа с уплотняемым материалом состоит из следующих шагов: 1 – предварительная подготовка станда и проверка готовности; 2 – размещение материала в соответствующую ёмкость; 3 – размещение средств контроля в рабочую зону; 4 – приведение подвижной части станда в исходную пози-

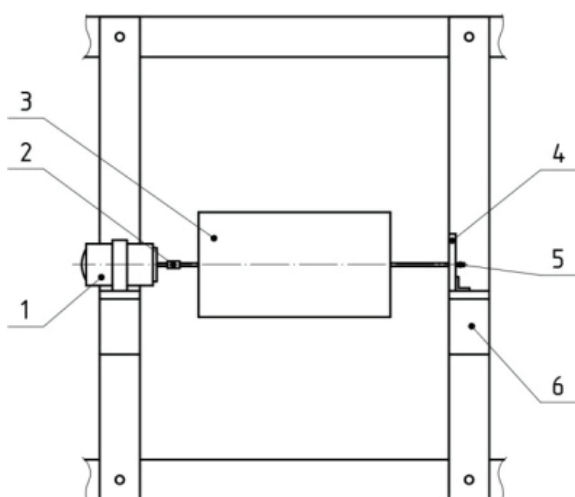


Рисунок 5 – Схема устройства рабочего органа:
1 – электромотор; 2 – гибкая муфта; 3 – валец;
4 – пластина с подшипником; 5 – ограничитель вала;
6 – кронштейн

Figure 5 – Scheme of the working body: 1 – electric motor;
2 – flexible coupling; 3 – drum;
4 – plate with the bearing; 5 – shaft stop; 6 – bracket

цию; 5 – подключение электроники; 6 – тестирование работоспособности; 7 – подготовка и перемещение ёмкости со смесью в рабочую зону; 8 – испытание рабочего органа; 9 – выключение всех систем, возврат подвижной части в исходную точку; 10 – проведение замеров, анализ полученных данных; 11 – заполнение таблицы. При необходимости эксплуатация и процесс исследования могут меняться для получения различных зависимостей взаимодействия рабочего органа с уплотняемой средой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Итогом сбора данных, полученных в ходе проведения экспериментов, является их конспектирование и дальнейший анализ. Следует производить достаточное количество опытов для уменьшения значения абсолютной погрешности. Параметры распределения находятся на основе экспериментальных данных⁸. После фиксации данных по интересующим параметрам следует усреднить их значение одним из следующих способов: най-

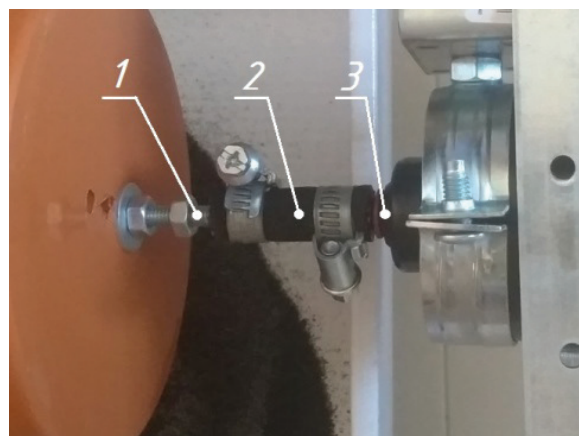


Рисунок 6 – Предохранительное устройство механизма вращения: 1 – вал; 2 – гибкая муфта с хомутами; 3 – шток мотора

Figure 6 – Safety device of the rotation mechanism: 1 – shaft; 2 – flexible coupling with clamps; 3 – motor rod

ти среднее арифметическое или геометрическое, а также взять средний член полученного вариационного ряда⁹ (с расположением чисел по возрастанию).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была получена принципиальная схема, обеспечивающая устойчивость стенда, защищенная от опрокидывания и разрушения конструкции. Возможность изменения рабочего пространства и положения уплотняемого материала за счет изменяемых размеров конструкции стенда даёт большие возможности для масштабирования экспериментов и точной настройки положения веществ в пространстве. Рабочий орган способен перемещаться по рабочей зоне с требуемой скоростью и по нужной траектории, а его привод может быть закреплен несколькими способами.

Таким образом, была создана рациональная схема лабораторного стенда для исследования рабочего органа катка и его воздействия на уплотняемый материал, обладающая гибкостью и универсальностью для исполь-

⁸ Бекряев В.И. Основы теории эксперимента: учебное пособие. СПб. : Изд. РГГМУ, 2001. 38 с.

⁹ Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : конспект лекций. Екатеринбург : ГОУВПО УГТУ-УПИ, 2004. 37 с.

зования в различных условиях, от маленьких помещений до обширных лабораторий и исследовательских центров.

Обобщая изложенные в статье данные с имеющимися в научной литературе по тематике работы, специалисты имеют возможность получить большой набор средств и инструментов для изучения проблематики взаимодействия рабочего оборудования катка с материалом. Кроме того, описанную принципиальную схему стенда возможно модернизировать в соответствии с конкретными изучаемыми параметрами. Это является большим плюсом концепции простоты и доступности компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишнеvский Д. Еще немного про асфальт // Высшее образование сегодня. 2018. № 2. С.82–89.
2. Aidin M., Hesham A., Farshad K., Mohamadtaqi B., Mojtaba M. Investigation of pavement raveling performance using smartphone. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 11, No. 6, 2018, pp. 553–563.
3. Hesham A., Mohamadtaqi B. Pavement Manager at Risk in Construction of Hot Mix Asphalt. Advances in Civil Engineering. No. 1, 2018, pp. 1–8.
4. Третьяков Р. Незаметный герой // Высшее образование сегодня. 2019. № 2. С.61–67.
5. Новоселов В. Дорожные катки. Государство в помощь // Спецтехника и коммерческий транспорт. 2017. № 2. С.24–29.
6. Халиулина Л.Э. Долговечность асфальтобетонных покрытий // Научный журнал, 2018. № 11. С.26–27.
7. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Мавлиев Л.Ф., Буланов Н.Е. Современные методы оценки эксплуатационных свойств дорожных асфальтобетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 279–285.
8. Шадриков В.Д. Пути подборов составов мелкозернистых асфальтобетонных смесей, наиболее устойчивых к процессам колееобразования // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2017. Том 5. № 1. С. 28–40.
9. Савельев С.В., Дубков В.В., Шушубаева М.К., Пермьяков В.Б. Осцилляторный валец дорожного катка с двойной обечайкой // Вестник СибАДИ. 2018. № 6 (64). С. 844–853. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-844-853>
10. Захаренко А.В., Пермьяков В.Б., Семёнов А.С., Максимов В.М. Перспективы разви-

тия конструкций асфальтоукладчиков и дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 2012. №2. С. 19–23.

11. Пермьяков В.Б., Дубков В.В., Серебренников В.С. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком // Омский научный вестник. 2008. №64. С. 67–71.

12. Mohamadtaqi B., Amirmasoud H., Mojtaba M., Hesham A. Asphalt Mixture Segregation Detection: Digital Image Processing Approach. Advances in Materials Science and Engineering. No. 1, 2018, pp.1-8.

13. Jo S.D., Matthew C., Christopher J., Rasool N., Eshan V.D., Ashton C. Comparison of asphalt mixture specimen fabrication methods and binder tests for cracking evaluation of field mixtures. Road Materials and Pavement Design. Vol. 20, No. 5, 2019, pp. 1059–1075.

14. Третьяков Р. Следом за асфальтоукладчиком и не только // Высшее образование сегодня. 2014. № 10. С. 58–67.

REFERENCES

1. Vishnevskij D. Eshhe nemnogo pro asfal't [A little bit more about asphalt]. *Vysshee obrazovanie segodnja*. 2018; 2: 82–89 (in Russian).
2. Aidin M., Hesham A., Farshad K., Mohamadtaqi B., Mojtaba M. Investigation of pavement raveling performance using smartphone. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 11, No. 6, 2018, pp. 553–563.
3. Hesham A., Mohamadtaqi B. Pavement Manager at Risk in Construction of Hot Mix Asphalt. Advances in Civil Engineering. No. 1, 2018, pp. 1–8.
4. Tret'jakov R. Nezametnyj geroj [Invisible hero]. *Vysshee obrazovanie segodnja*. 2019; 2: 61–67 (in Russian).
5. Novoselov V. Dorozhnye katki. Gosudarstvo v pomoshh' [Road rollers. State to help]. *Spektelnika i kommercheskij transport*. 2017; 2: 24–29 (in Russian).
6. Haliulina L.Je. Dolgovechnost' asfal'tobetonnyh pokrytij [Durability of asphalt concrete pavements]. *Nauchnyj zhurnal*. 2018; 11: 26–27 (in Russian).
7. Hafizov Je.R., Vdovin E.A., Fomin A.Ju., Mavliev L.F., Bulanov N.E. Sovremennye metody ocenki jekspluatacionnyh svojstv dorozhnyh asfal'tobetonov [Modern methods for evaluating the performance properties of road asphalt concrete]. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017; 2: 279–285 (in Russian).
8. Shadrikov V.D. Puti podborov sostavov

melkozernistyh asfal'tobetonnyh smesej, naibolee ustojchivyh k processam koleeobrazovaniya [Ways of selection of compositions of fine-grained asphalt concrete mixtures, the most resistant to the processes of rutting]. *Transportnye sooruzheniya*. 2017; 1, Vol 5: 28–40 (in Russian).

9. Savel'ev S.V., Dubkov V.V., Shushubaeva M.K., Permjakov V.B. Oscillatornyj valec dorozhnogo katka s dvojnoj obechajkoj [Oscillator roll of a road roller with a double rim]. *Vestnik SibADI*. 2018; 64: 844–853 (in Russian).

10. Zaharenko A.V., Permjakov V.B., Semjonov A.S., Maksimov V.M. Perspektivy razvitiya konstrukcij asfal'toukladchikov i dorozhnyh katkov [Prospects for the development of designs of pavers and road rollers]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 2: 19–23 (in Russian).

11. Permjakov V.B., Dubkov V.V., Serebrennikov V.S. Analiticheskoe opisanie processa uplotneniya asfal'tobetonnoj smesi vibracionnym katkom [An analytical description of the process of compaction of asphalt concrete mix with a vibratory roller]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2008; 64: 67–71 (in Russian).

12. Mohamadtaqi B., Amirmasoud H., Mojtaba M., Hesham A. Asphalt Mixture Segregation Detection: Digital Image Processing Approach. *Advances in Materials Science and Engineering*. No. 1, 2018, pp.1–8.

13. Jo S.D., Matthew C., Christopher J., Rasool N., Eshan V.D., Ashton C. Comparison of asphalt mixture specimen fabrication methods and binder tests for cracking evaluation of field mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 20, No. 5, 2019, pp. 1059–1075.

14. Tret'jakov R. Sledom za asfal'toukladchikomi ne tol'ko [Following the asphalt paver and not only]. *Vysshee obrazovanie segodnja*. 2014; 10: 58–67 (in Russian).

Поступила 21.07.2019, принята к публикации 27.08.2019.

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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казаков Олег Юрьевич – аспирант; МАДИ ГТУ «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», (Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64); Машиностроительный завод «БЕЦЕ-МА», инженер-конструктор, (Россия, 143405,

Московская область, г. Красногорск, Ильинское ш., дом 15а); e-mail: 4informatika@mail.ru. ORCID 0000-0002-5747-6072.

Кустарев Геннадий Владимирович – проф., канд. техн. наук, доц., AuthorID: 582823; МАДИ ГТУ «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», заведующий кафедрой, (Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64; e-mail: projectdm@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg Y. Kazakov – Postgraduate, Design Engineer, “BECEMA” Machinery Factory, Moscow State Automobile and Highway Technical University, ORCID 0000-0002-5747-6072 (125319, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave., e-mail: 4informatika@mail.ru).

Gennady V. Kustarev – Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State Automobile and Highway Technical University, AuthorID: 582823 (125319, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave., e-mail: projectdm@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Статья была подготовлена совместно с заведующим кафедрой МАДИ «Дорожно-строительные машины» Кустаревым Геннадием Владимировичем в рамках научной деятельности кафедры.

Казаков Олег Юрьевич. Проектирование и сборка экспериментального стенда, создание методики для проведения исследований, редактирование статьи. Вклад соавтора составляет 50%.

Кустарев Геннадий Владимирович. Формулирование задач и цели создания стенда, руководство и участие в проектировании конструкции, анализ полученных результатов. Вклад соавтора составляет 50%.

AUTHORS' CONTRIBUTION

The paper is prepared within the scientific activity of the department with Gennady V. Kustarev, Head of the Department of the Road Construction Machines.

Oleg Y. Kazakov – designing and assembling an experimental stand; creating a methodology; manuscript's editing. The author's contribution is 50%.

Gennady V. Kustarev – formulation of tasks and goals of the stand's creating; leadership and participation in the construction design; results' analysis. The author's contribution is 50%.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МОБИЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ. ОПЫТ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

М.Н. Артеменко¹, П.А. Корчагин², И.А. Тетерина²

¹Сотое военное представительство,
г. Омск, Россия

²ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
iateterina@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Робототехника сегодня одно из важнейших направлений фундаментальных, научно-технических и прикладных исследований, основными проблемами которого являются разработка схем получения информации об окружающей среде, создание искусственного интеллекта и эффективных систем управления сложными динамическими объектами в условиях существующей неопределенности. В последние годы робототехника переживает этап стремительного развития, все больше охватывая гражданскую и военную сферы человеческой деятельности. Количество разработанных и внедренных мобильных беспилотных роботизированных комплексов военного и двойного назначения в разы превышает количество разработок роботизированных комплексов гражданского назначения. Целью данной работы является обзор наиболее перспективных на сегодняшний день образцов мобильной беспилотной роботизированной техники, применяемой в различных сферах человеческой деятельности.

Результаты. В статье проведен обзор современных разработок мобильных беспилотных роботизированных комплексов гражданского назначения, применяемых в сельскохозяйственном комплексе, промышленном и гражданском строительстве, а также грузоперевозках. Рассмотрены перспективные образцы российской и иностранной беспилотной роботизированной техники. Сформулированы факторы, от которых в большей степени зависит потребность ключевых сфер человеческой деятельности в создании и внедрении беспилотных мобильных роботизированных комплексов. Приведен перечень основных программ и концепций развития Российской Федерации, в соответствии с которым ведутся разработки в области роботизации.

Обсуждение и заключение. Выявлены основные элементы автоматизированных систем управления, навигации и автопилотирования, выступающие базой мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Раскрыто понятие «фовеальное зрение», позволяющее быстро и точно распознавать неровности дорожного полотна и препятствия на пути следования транспортного средства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мобильные роботизированные комплексы, робототехника, строительно-дорожные машины, грузовые автомобили, карьерные машины, техника для сельскохозяйственных работ, система автопилотирования, навигаторы, дальномер Lidar, фовеальное зрение.

© М.Н. Артеменко, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT TRENDS OF UNMANNED ROBOTIC SYSTEMS: EXPERIENCE OF DOMESTIC AND FOREIGN MANUFACTURERS

M.N. Artemenko¹, P.A. Korchagin², I.A. Teterina²
Omsk Military Representation Number Hundred,

Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

iateterina@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Nowadays robotics is one of the most important directions of fundamental, technical, scientific and applied research. The main robotics' challenges are to develop schemes for obtaining information about environment and the creation of artificial intelligence effective systems of the complex dynamic objects' control in uncertainty conditions. Recently, robotics is going through the stage of rapid development, more and more covering the civilian and military spheres of human activity. The number of developed and implemented mobile unmanned robotic complexes of military and dual-use exceeds the number of robotic complexes in progress. The purpose of the research is to review the most promising samples of mobile unmanned robotic equipment used in various fields of human activity.

Results. The paper reviewed the modern developments of mobile unmanned robotic complexes applied in the agricultural complex, industrial and civil construction, and in cargo transportation. The authors analyzed promising samples of Russian and foreign unmanned robotic technology. Moreover, the authors presented factors that increasingly depended on key spheres of human activities in the development and implementation of mobile robotic systems. Therefore, the paper demonstrated the list of major programs and concepts for the development of the Russian Federation in robotic sphere.

Discussion and conclusions. As a result, the authors identify the basic elements of automated control systems, of navigation and autopilot system basing on mobile unmanned robotic complexes. The paper also reveals the concept of the foveal vision, which allows quickly and accurately detect pavement roughness and obstacles on the vehicle's way.

KEYWORDS: mobile robotic systems, robotics, construction and road machinery, trucks, mining machinery, agricultural equipment, autopilot system, navigation, Lidar rangefinder, foveal vision.

© M.N. Artemenko, P.A. Korchagin, I.A. Teterina



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

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость и актуальность создания мобильных беспилотных роботизированных комплексов (МБРТК) специально, двойного и гражданского назначения не вызывает сомнения. Особое внимание этому направлению уделяется в различных документах долгосрочного планирования страны. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (в том числе машиностроительный комплекс) предусматривает разработку автомобилей с интеллектуальными системами, создание более автоматизированного и роботизированного безлюдного производства¹. Также Правительством РФ в 2000–2018 годах приняты: Стратегия развития автомобильной промышленности РФ на период до 2025 года², Распоряжение Правительства РФ от 01.11.13 № 2036-р «Об утверждении стратегии развития отрасли информационных технологий в РФ на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года»³, «Концепция долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года»⁴, Государственная программа РФ «Развитие промышленности и повышения ее конкурентоспособности» (ред. от 16.02.16 года), Приказ Минтруда РФ от 02.11.15 года № 831 «Об утверждении списка 50 наиболее востребованных на рынке труда новых и перспективных профессий, требующих среднего специального образования (мобильный робототехник)»⁵. Кроме этого, постоянно совершенствуются госу-

дарственные и национальные стандарты в этой области [1].

Надо отметить стремительные темпы распространения роботизации на технику военного и специального назначения. Возможно, это связано с явным акцентом правительств разных стран на необходимость и актуальность темы укрепления обороноспособности.

Разработка мобильных беспилотных роботизированных комплексов активно ведется различными ведомствами Минобороны, МВД, ФСБ и МЧС, утвердившими ряд программ и концепций развития относительно своей специализации. Разработки ведутся в этой области в соответствии с комплексной программой «Роботизация – 2020», комплексной целевой программой «Создание перспективной военной робототехники до 2025 года», «Объединенной программой создания комплексов с беспилотными летательными аппаратами, наземных робототехнических комплексов и морской роботизированной системы для Вооруженных сил Российской Федерации в 2011–2020 гг.»⁶, «Концепцией применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами в Вооруженных Силах Российской Федерации на период до 2025 года»⁷ [2].

Однако, несмотря на важность обеспечения обороноспособности стран, нельзя исключать другие отрасли, такие как медицина, сельское хозяйство, дорожное и гражданское строительство, горнодобывающая промышленность, также требующие модернизации и внедрения разработок робототехники, в том числе МБРТК.

¹ Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение правительства РФ от 03.01.2014 г. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380>

² Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года: Распоряжение Правительства РФ N 831-р от 28.04.2018 г. [Электронный ресурс]: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297129/

³ Распоряжение правительства РФ от 01.11.13 № 2036-р «Об утверждении стратегии развития отрасли информационных технологий в РФ на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года» <http://base.garant.ru/70498122/>

⁴ «О концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года»: Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 N 1662-р (ред. от 28.09.2018) [Электронный ресурс]: URL: <http://www.zakonpro.ru/content/base/part/593274>

⁵ Приказ Минтруда РФ от 02.11.15 г. № 831 «Об утверждении списка 50 наиболее востребованных на рынке труда новых и перспективных профессий, требующих среднего специального образования» <https://rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/436>.

⁶ Корчагин П.А. К вопросу о выборе системы управления роботизированным комплексом на базе строительно-дорожной машины / П.А. Корчагин, М.Н. Артеменко, И.А. Тетерина // В сборнике : Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. С. 67–70.

⁷ О перспективах развития роботизированных комплексов различного назначения. Режим доступа: <http://government.ru/news/14804/> (дата обращения: 11.12.2018).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является обзор наиболее перспективных на сегодняшний день образцов мобильной беспилотной роботизированной техники, применяемой в различных сферах человеческой деятельности. Авторы ставили перед собой цель отразить как российский опыт применения МБРТК, так и рассмотреть наиболее эффективные примеры роботизации других государств.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рост потребности в роботизации той или иной сферы деятельности обусловлен рядом факторов. Очевидно, что для каждого отдельного государства перечень этих факторов будет меняться. Для Российской Федерации можно выделить следующие^{8,9} [2]:

1. Рост государственных инвестиций в развитие робототехники.
2. Увеличение межведомственных программ развития робототехники.
3. Прогрессивные решения руководства компаний о полной роботизации предприятий и производств взамен механизации.
4. Скорость внедрения систем GPS/GLONASS¹⁰ [2].
5. Рост конкурентных преимуществ, в том числе за счет снижения производственных издержек разработчиков роботизированных комплексов¹¹.
6. Преодоление пассивности на внутреннем рынке потребителей.
7. Трансфер рыночных ниш и компетенций по выводу гражданских роботов РФ на мировые рынки по аналогии с экспортом военных роботизированных систем.
8. Готовность российского бизнеса и ученых работать в международных и национальных кооперационных платформах и кластерах.

9. Универсальность производимых в Российской Федерации роботизированных комплексов.

10. Низкая квалификация и отсутствие кадров мирового уровня, способных создавать группы промышленных дизайнеров, сервисных инженеров, маркетологов робототехнических проектов.

11. Синхронизация роботизированных комплексов с используемым оборудованием.

12. Отсталость инновационной инфраструктуры и условий (среды) для робототехнических проектов.

13. Недостаточность комплексного формирования государственного заказа в Российской Федерации и стимулирования спроса на роботизированные комплексы¹².

ПРИМЕРЫ ЗАРУБЕЖНЫХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ. ТЕХНИКА ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ

В зарубежных странах работы по созданию мобильных беспилотных роботизированных тракторов для сельскохозяйственного сектора ведутся активно¹³. Внедрение МБРТК позволяет автоматизировать большое количество рабочих операций, повысить качество и производительность труда (включая проведение работ в ночное время), снизить издержки в условиях нестабильного по погодным критериям земледелия.

Финская компания Valtra Inc., разработчик и производитель тракторов, второй по величине поставщик сельскохозяйственной техники в Латинскую Америку. Одной из уникальных разработок компании считается трактор Valtra RoboTrac (рисунк 1)¹⁴ [3]. Трактор представляет собой МБРТК, способный вы-

⁸ Российская робототехника. Режим доступа: https://ruxpert.ru/Российская_робототехника (дата обращения: 28.01.2019).

⁹ Рынок робототехники в России: предложения по развитию. Режим доступа: <https://docplayer.ru/70889420-Rynok-robototekhniki-v-rossii-predlozheniya-po-razvitiyu.html> (дата обращения: 28.01.2019)

¹⁰ Российская робототехника. Режим доступа: https://ruxpert.ru/Российская_робототехника (дата обращения: 28.01.2019).

¹¹ Там же.

¹² Российская робототехника. Режим доступа: https://ruxpert.ru/Российская_робототехника (дата обращения: 28.01.2019).

¹³ Совершенство для сельского хозяйства. Режим доступа: <https://geosystems.ru/use/obshchee/articles/sovershenstvo-dlya-selskogo-khozyaystva/> (дата обращения: 07.11.2018).

¹⁴ VALTRA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.valtra.ru/about-valtra.aspx> (дата обращения: 22.12.2018).



Рисунок 1 – Трактор RoboTrac Valtra

Figure 1 – RoboTrac Valtra tractor



Рисунок 2 – Беспилотный трактор FMTC

Figure 2 – Unmanned FMTC Tractor

полнять целый комплекс сельскохозяйственных работ (см. рисунок 1)^{15,16}.

Valtra RoboTrac предназначен для работ на виноградниках, кофейных и фруктовых плантациях. Функционал трактора позволяет самостоятельно вспахивать, обрабатывать и засеивать почву, орошать посевы. Управление трактором осуществляется с помощью GNSS-навигаторов и интернета^{17,18}.

Другим положительным примером применения использования МБРТК в сельском хозяйстве можно считать беспилотный мобильный трактор, сконструированный бельгийскими учеными в центре мехатроники Фландрии (FMTC), объединяющем ряд машиностроительных компаний и ученых Левенского университета (рисунок 2)¹⁹.

Представленный вид сельскохозяйственной техники оборудован системами управления двигателя, тормозной системой и рулевым колесом, комплектом датчиков, в том числе GNSS-устройством. На основе анализа почвы машина самостоятельно определяет скоростной режим и радиус угла поворота с точно-



Рисунок 3 – Трактор YTO с АСУ Leica iCON

Figure 3 – YTO tractor with an automated control Leica iCON system

стью до нескольких сантиметров²⁰. Поскольку при отсутствии твердого покрытия скоростной режим нестабилен, трактор оснащен датчиками, способными отслеживать все неровности микрорельефа. Решение о повороте принимается техникой на основе данных GNSS-у-

¹⁵ Совершенство для сельского хозяйства. Режим доступа: <https://geosystems.ru/use/obshchee/articles/sovershenstvodya-selskogo-khozyaystva/> (дата обращения: 07.11.2018).

¹⁶ VALTRA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.valtra.ru/about-valtra.aspx> (дата обращения: 22.12.2018).

¹⁷ Совершенство для сельского хозяйства. Режим доступа: <https://geosystems.ru/use/obshchee/articles/sovershenstvodya-selskogo-khozyaystva/> (дата обращения: 07.11.2018).

¹⁸ VALTRA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.valtra.ru/about-valtra.aspx> (дата обращения: 22.12.2018).

¹⁹ FLANDERSMAKE: сайт компании. Режим доступа: <https://www.flandersmake.be/nl> (дата обращения: 22.12.2018).

²⁰ FLANDERSMAKE: сайт компании. Режим доступа: <https://www.flandersmake.be/nl> (дата обращения: 22.12.2018).



а



б

Рисунок 4 – Сельскохозяйственная техника Hands Free Hectare:
а – беспилотный комбайн; б – беспилотный трактор

Figure 4 – Agricultural Hands Free Hectare equipment:
a – unmanned combine; b – unmanned tractor

стройств, поддерживая, таким образом, заданное направление²¹.

В 2018 году швейцарской компанией Leica Geosystems подписан долгосрочный договор с китайским производителем спецтехники УТО на поставку оборудования для управления МБРТК на базе трактора (рисунок 3) [4].

В состав системы входит телематическое оборудование Leica iCON, обеспечивающее передачу данных о работе машины в офис компании и получение техподдержки онлайн [4]. Базовая версия системы может иметь как двухмерную (2D), так и трехмерную (3D) форму. Управление может осуществляться по сигналам тахографа, GPS/GLONASS, а также по лазерным и ультразвуковым сигналам. Блоки автоматизированной системы управления быстросъемные и при необходимости могут использоваться на других машинах [5].

Британский проект Hands-Free Hectare показал, что на сегодняшний день можно практически полностью автоматизировать полевые работы, доверив это МБРТК [5]. В рамках проекта использовался беспилотный трактор и беспилотный комбайн (рисунок 4), которыми

был выполнен весь цикл полевых работ от засеивания опытного гектара до опрыскивания и уборки урожая [5].

Автоматизация сельскохозяйственных работ – актуальная сфера развития робототехники. Традиционно для этого применяются специальные агротехнические комплексы и сложные механизмы²²[5]. Вплоть до недавнего времени для управления перемещением техники по полю при вспахивании, засеивании и уборке урожая требовались люди²³. Однако в последнее время технологии беспилотного вождения активно внедряются в сельскохозяйственную технику. Об этом свидетельствует появление сельскохозяйственных дронов и беспилотных тракторов, позволяющих снизить прямое участие человека в различного рода полевых работах [5].

БЕСПИЛОТНАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Калифорнийская фирма Built Robotics разработала прототип беспилотного самоуправляемого экскаватора²⁴. Модифицированный мини-погрузчик Bobcat (рисунок 5) способен свободно перемещаться по строительной пло-

²¹ Роботы засеяли гектар и собрали с него урожай почти без участия человека. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2017/09/09/robot-in-the-rye> (дата обращения: 22.12.2018).

²² Роботы засеяли гектар и собрали с него урожай почти без участия человека. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2017/09/09/robot-in-the-rye> (дата обращения: 22.12.2018).

²³ Там же.

²⁴ Беспилотный мини-погрузчик от Built Robotics сделает всю грязную работу. Режим доступа: <http://dormtehteh.ru/bespilotnyj-mini-pogruzchik-ot-built-robotics-sdelat-vsyu-gryaznyuyu-rabotu> (дата обращения: 16.11.2018).



Рисунок 5 – Беспилотный погрузчик Built Robotics

Figure 5 – Built Robotics unmanned loader

щадке, преодолевая и объезжая препятствия, а также разрабатывать котлован с учетом заданных геометрических размеров.

Для реализации работы в беспилотном режиме погрузчик оснащен высокоточным GPS-приемником, модулем беспроводной связи, системой распознавания образов и оптическим дальномером Lidar. Особенностью дальномера, установленного на эту модель строительно-дорожной техники, является то, что он рассчитан на значительно большие по сравнению с предыдущими моделями удары и вибрации²⁵.

Кроме пространственной ориентации экскаватор оснащен сенсорами, предназначенными для отслеживания наполняемости ковша, а также для исключения наезда на людей, находящихся на строительной площадке²⁶. В случае приближения людей МБРТК временно останавливается [4]. Кроме этого, GPS-приемник в сочетании с наземным передатчиком, установленным на строительном объекте, по-

зволяет экскаватору отслеживать свое местоположение с точностью до сантиметра²⁷.

Шведская компания Volvo в 2018 году представила свою разработку – беспилотный грузовик (рисунок 6). В 2019 году был заключен контракт на использование беспилотных грузовиков норвежской горнодобывающей компанией Bronnoy Kalk. В конце 2019 года к полноценной эксплуатации приступят шесть МБРТК на базе тягачей Volvo²⁸.



Рисунок 6 – Беспилотный грузовик Volvo

Figure 6 – Volvo unmanned truck

Машины будут транспортировать добытый с рудника известняк до порта и разгружать его в измельчитель. Оттуда сырье будет загружаться на баржу²⁹ [5]. Длина трассы от рудника до места выгрузки составляет около 4,8 км³⁰. Передвигаясь по заранее заданному маршруту, автомобилям придется проезжать через два длинных тоннеля (длина первого составляет около 3,5 км, второго – около 800 м). Для движения по маршруту автомобили используют набор из GPS-датчиков, радар, а также сенсоры дальномера Lidar³¹.

²⁵ Беспилотный мини-погрузчик от Bault Robotics сделает всю грязную работу. Режим доступа: <http://dormehteh.ru/bespilotnyj-mini-pogruzchik-ot-built-robotics-sdelaet-vsyu-gryaznuyu-rabotu> (дата обращения: 16.11.2018).

²⁶ Ендачев Д.В. Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ендачев Денис Владимирович. Москва, 2016. С.19.

²⁷ Беспилотный мини-погрузчик от Bault Robotics сделает всю грязную работу. Режим доступа: <http://dormehteh.ru/bespilotnyj-mini-pogruzchik-ot-built-robotics-sdelaet-vsyu-gryaznuyu-rabotu> (дата обращения: 16.11.2018).

²⁸ Ендачев Д.В. Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ендачев Денис Владимирович. Москва, 2016. С.19.

²⁹ Ендачев Д.В. Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ендачев Денис Владимирович. Москва, 2016. С.19.

³⁰ Беспилотные БЕЛАЗы: роботы к работе готовы. Режим доступа: <https://st-kt.ru/articles/bespilotnye-belazy-roboty-k-rabote-gotovy> (дата обращения: 28.01.2019)

³¹ Беспилотные БЕЛАЗы: роботы к работе готовы. Режим доступа: <https://st-kt.ru/articles/bespilotnye-belazy-roboty-k-rabote-gotovy> (дата обращения: 28.01.2019)



Рисунок 7 – Беспилотные карьерные машины на базе БЕЛАЗ

Figure 7 - Unmanned quarry vehicles based on BELAZ

В ноябре 2018 года Белорусским заводом машиностроения были созданы две беспилотные карьерные машины [6]: беспилотный самосвал БЕЛАЗ-7513R и погрузчик БЕЛАЗ-78250 (рисунок 7)^{32, 33}.

Уникальность проекта заключается в том, что беспилотные МБРТК были созданы на базе одной из самых больших строительно-дорожных машин – самосвала, способного транспортировать объемы груза до 136 т и погрузчика грузоподъемностью 22 т [4, 6].

МБРТК были разработаны в рамках реализации проекта «Интеллектуальный карьер» с участием московской компании VIST Robotics, специализирующейся на создании систем управления технологическими процессами на открытых горных работах в полностью автономном режиме, а также международной компании «Цифра», известной своими пере-

довыми цифровыми технологиями в промышленности³⁴.

Нужно отметить, что погрузчик в автономном режиме движения способен только перемещаться к месту работы, а забором грунта в ковш и его погрузкой в кузов самосвала управляет оператор [7]. Управление происходит удаленно, и величина удаления не имеет принципиального значения. Пульт управления состоит из четырех мониторов, на трех из которых отражена окружающая погрузчика обстановка, а на четвертом – в онлайн-режиме параметры машины [7].

В отличие от погрузчика роботизированный самосвал полностью автоматизирован³⁵. Работа машины осуществляется по заранее заложенной в нее программе, в соответствии с которой она работает, следуя по заданному маршруту к местам погрузки и разгрузки, делая это в ограниченном по ширине движения

³² Беспилотные БЕЛАЗы: роботы к работе готовы. Режим доступа: <https://st-kt.ru/articles/bespilotnye-belazy-roboty-k-rabote-gotovy> (дата обращения: 28.01.2019)

³³ Тетерина, И.А., Артеменко М.Н. Системы управления роботизированных строительно-дорожных машин: сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». 2017. С. 61–64.

³⁴ Тетерина, И.А., Артеменко М.Н. Системы управления роботизированных строительно-дорожных машин: сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». 2017. С. 61–64.

³⁵ Беспилотные грузовики: восстание машин началось. Режим доступа: <https://econet.ua/articles/6652-bespilotnye-gruzoviki-vosstanie-mashin-nachalos> (дата обращения: 16.11.2018).

коридоре, за границы которого не выйдет ни при каких обстоятельствах³⁶.

МБРТК оснащены навигационными системами GPS/GLONASS, видеокамерами, радары, системой Lidar. Движение по заданному маршруту осуществляется за счет того, что машина постоянно обменивается данными с навигационной системой и с системой позиционирования самого карьера, а также сверяется с бортовой инерциальной системой позиционирования. Точность определения координат с помощью спутниковых систем составляет 99% (погрешность системы 2–3 см). При этом все 3 системы проверяют друг друга, а в случае необходимости дублируют друг друга.

КОЛОННЫ МОБИЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

К основным достоинствам разработок компаний, работающих над созданием беспилотных грузовых автомобилей, относят:

- улучшение дорожной безопасности (снижение негативного влияния человеческого фактора, который является причиной 80% дорожно-транспортных происшествий);
- экономию топлива на 20%;
- работу водителей (присутствующие в ведомых машинах как наблюдатели) в более комфортных условиях;
- разгрузку автомобильных дорог в связи с возможностью уплотнения интервалов между автопоездами³⁷.

Запрограммировав колонну из нескольких грузовиков, движущихся друг за другом на расстоянии не более четырех метров, японская компания по развитию энергетических промышленных технологий New Energy and

Industrial Technology Development Organization, NEDO успешно провела испытания, подтвердив значительную экономию топлива в результате внедрения беспилотных грузовиков. Сокращение расхода топлива достигается путем снижения сопротивления воздуха между автомобилями (рисунок 8, а)³⁸.

В 2017 году немецкий автопроизводитель Daimler провел первые заезды колонн МБРТК из трех грузовиков Mercedes-Benz Actros на трассе Штутгарт-Роттердам (8, б)³⁹.

Система автопилотирования Highway Pilot, представленная компанией Daimler, включает в себя большое количество датчиков, камеры видеонаблюдения и активные регуляторы скорости⁴⁰. При неблагоприятных погодных условиях или отсутствии дорожной разметки электроника световыми или звуковыми сигналами дает команду водителю взять управления на себя, беспилотный грузовик автоматически останавливается⁴¹.

Движение в колонне обеспечивается с помощью системы автопилотирования Highway Pilot Connect, которая позволяет идущим друг за другом грузовикам обмениваться посредством беспроводной связи информацией о текущей ситуации на дороге [8]. Система гарантирует мгновенную передачу информации, поскольку следующие сзади грузовики всегда осведомлены о состоянии и действиях головного длинномера⁴².

При движении грузовиков на расстоянии 15 м друг от друга, вместо обычных 50 м, необходимых для грузовиков управляемых водителем, оптимизируется воздушный поток и уменьшается лобовое сопротивление для машин, следующих за ведущим автомобилем. Такое решение значительно снижает расход

³⁶ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

³⁷ Беспилотные грузовики: восстание машин началось. Режим доступа: <https://econet.ua/articles/6652-bespilotnye-gruzoviki-vosstanie-mashin-nachalos> (дата обращения: 16.11.2018).

³⁸ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

³⁹ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

⁴⁰ Беспилотные грузовики: восстание машин началось. Режим доступа: <https://econet.ua/articles/6652-bespilotnye-gruzoviki-vosstanie-mashin-nachalos> (дата обращения: 16.11.2018).

⁴¹ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

⁴² Беспилотные грузовики появятся на российских дорогах летом. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2018/03/21/driverless> (дата обращения: 25.12.2018).



а



б

Рисунок 8 – Движение МБРТК в колонне: а – Япония; б – Германия

Figure 8 – ICBT movement in the column: a – Japan; b – Germany

топлива и сокращает количество выбросов вредных газов в атмосферу⁴³.

Немецкая фирма Gotting KG представила иную технологию автоматизированного управления автомобильной колонной, состоящей из нескольких самосвалов⁴⁴. Ведущая машина колонны управляется профессиональным водителем, электронные устройства при этом отслеживают его действия и передают их по радиосвязи в виде команд контроллерам, установленным в следующих за ведущей машиной транспортных средствах. Все ведомые самосвалы оборудованы лазерными сканерами для контроля движения впереди идущего автомобиля⁴⁵.

Разработки в области создания мобильных беспилотных колонн техники перспективны при решении задач:

- транспортировки сельскохозяйственных грузов,

- добычи полезных ископаемых в горнорудной промышленности,
- строительстве дорог,
- перевозок в арктической зоне,
- перевозок грузов в опасных для жизни и здоровья человека условиях^{46,47}.

ПРИМЕРЫ РОССИЙСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

В 2016 году машиностроительный завод «КамАЗ» провел испытания первого беспилотного грузовика, созданного на базе серийного КамАЗ-5350 (рисунок 9, а). Машина разработана совместно с компаниями Cognitive Technologies и «ВИСТ Групп»⁴⁸. МБРТК оснащен радиолокационными станциями, дальнометром Lidar, видеокамерами, оборудованном GPS-навигации, вычислительным блоком

⁴³ Беспилотные грузовики: восстание машин началось. Режим доступа: <https://econet.ua/articles/6652-bespilotnye-gruzoviki-vosstanie-mashin-nachalos> (дата обращения: 16.11.2018).

⁴⁴ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

⁴⁵ Беспилотные грузовики Mercedes-Benz отправились в поездку колонной. Режим доступа: <https://3dnews.ru/931035> (дата обращения: 26.12.2018).

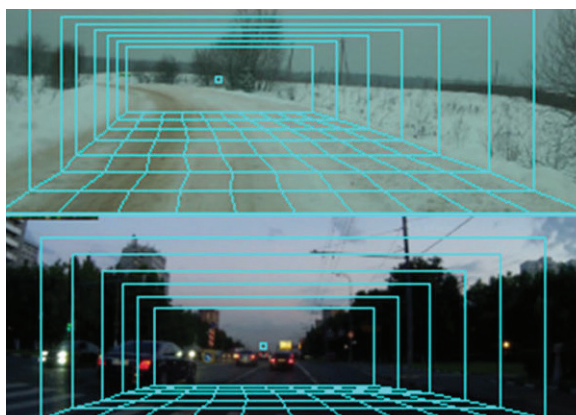
⁴⁶ О перспективах развития роботизированных комплексов различного назначения. Режим доступа: <http://government.ru/news/14804/> (дата обращения: 11.12.2018).

⁴⁷ Корчагин, П.А., Артеменко М.Н., Тетерина И.А. К вопросу о выборе системы управления роботизированным комплексом на базе строительно-дорожной машины: сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». 2019. С. 67–70.

⁴⁸ Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).



а



б

Рисунок 9 – Роботизированный комплекс КАМАЗ:
а – беспилотный грузовик на базе КамАЗ-5350;
б – визуализация компьютерной модели фовеального зрения

Figure 9 – KAMAZ robotic complex:
a – unmanned truck based on KamAZ-5350;
b – visualization of the computer foveal vision model

и программным обеспечением. Кроме того, специалисты ОАО «КамАЗ» собрали мобильный пункт управления машиной^{49,50}.

В рамках этого проекта была создана компьютерная модель фовеального зрения, которая позволяет МБРТК тратить на анализ видеоизображения дороги меньше вычислительных мощностей, а также позволяет быстрее и точнее распознавать особенности дороги и объектов на ней (рисунок 9, б)⁵¹.

Фовеальное зрение – особенность человеческого восприятия, когда четкое видение объектов возможно только в рамках довольно узкого угла зрения⁵². Зона фовеального зрения охватывает пространство, расположенное в центре и немного по сторонам от зрительной

оси глаза^{53, 54}. Расходящийся угол такого зрения составляет в среднем всего один–два процента. Объекты, находящиеся за пределами фовеального восприятия, видятся нечеткими и размытыми и располагаются в зонах периферического зрения⁵⁵.

АГРОТЕХНИКА РОСТСЕЛЬМАША С СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ COGNITIVE TECHNOLOGIES

В России разработками в области роботизации техники активно занимается компания Cognitive Technologies. Проект по созданию «умного» агрохолдинга «Агрополис» реализуется компанией совместно с производителем

⁴⁹ Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).

⁵⁰ «КамАЗ» начал испытания беспилотного грузовика – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/06/04/driverless> (дата обращения: 01.12.2018).

⁵¹ Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).

⁵² Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).

⁵³ Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).

⁵⁴ «КамАЗ» начал испытания беспилотного грузовика – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/06/04/driverless> (дата обращения: 01.12.2018).

⁵⁵ Российские беспилотные автомобили получают фовеальное зрение. Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2015/09/10/look> (дата обращения: 25.12.2018).



а



б

*Рисунок 10 – Сельскохозяйственная техника:
а – роботизированный комбайн;
б – роботизированный трактор*

*Figure 10 – Agricultural machinery:
a – robotic combine; b – robotic tractor*

агротехники «Ростсельмаш» и агрохолдингом «Союз-Агро» на базе ОЭЗ «Иннополис»⁵⁶.

В 2017 году успешно прошли полевые испытания беспилотного комбайна (рисунок 10, а), а летом 2018 года состоялись полевые испытания беспилотного трактора (рисунок 10, б), который способен самостоятельно убирать урожай зерновых, не выезжая за границы поля⁵⁷.

Установленные на технику программно-аппаратные комплексы компьютерного зрения включают в себя:

- стереопару (состоящую из двух видеокamer);
- навигационные и инерционные датчики GPS/GLONASS;
- вычислительный блок^{58, 59}.

Трактор оборудован дальномером Lidar, и это позволяет ему работать в темное время суток⁶⁰. Одновременно с выполнением предпосевных работ (боронование, распыление удобрений) тракторами производится оцифровка посевных площадей и составляется карта рабочей площади (рисунок 11, а)⁶¹. Сбор данных осуществляется весной, когда посевные площади еще не засеяны и опасные объекты не скрыты в сельскохозяйственных культурах⁶². Накопленная на стадии сбора информация об опасных объектах вносится в карту (размером от 10–15 см на расстоянии до 15–20 м) и учитывается при сборе урожая (рисунок 11, б)⁶³.

После составления карты машина может самостоятельно работать и учитывать данные об опасных объектах, даже если их не будет вид-

⁵⁶ Беспилотный трактор прошел тесты на полях в России. Режим доступа: <https://iz.ru/news/617516> (дата обращения 21.12.2018).

⁵⁷ Промышленная робототехника в России. Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях. Режим доступа: http://www.umpro.ru/index.php?art_id_1=395&group_id_4=92&page_id=17 (дата обращения: 15.12.2018).

⁵⁸ Беспилотный трактор прошел тесты на полях в России. Режим доступа: <https://iz.ru/news/617516> (дата обращения 21.12.2018).

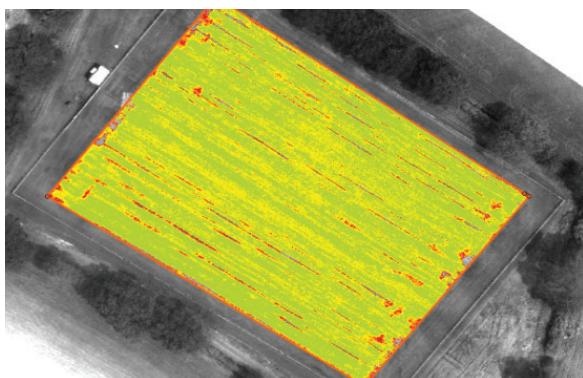
⁵⁹ Промышленная робототехника в России. Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях. Режим доступа: http://www.umpro.ru/?art_id_1=395&group_id_4=92&page_id=17 (дата обращения: 27.01.2019).

⁶⁰ Беспилотный трактор прошел тесты на полях в России. Режим доступа: <https://iz.ru/news/617516> (дата обращения: 21.12.2018).

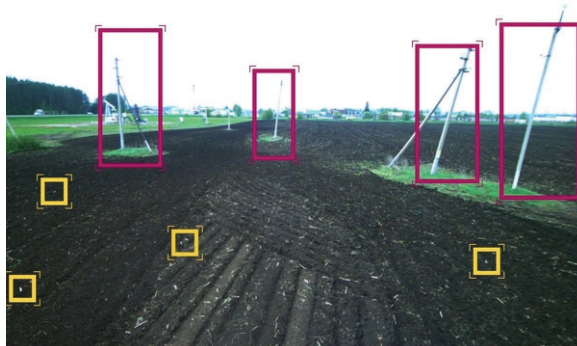
⁶¹ Agrobot беспилотный трактор. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 13.02.2019).

⁶² Agrobot беспилотный трактор. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 13.02.2019).

⁶³ Agrobot беспилотный трактор. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 13.02.2019).



а



б

Рисунок 11 – Работа системы Cognitive Technologies:
а – составление карты рабочей площади;
б – составление карты опасных объектов

Figure 11 – Operation of Cognitive Technologies:
a – mapping of the working area;
b – mapping of hazardous objects

но, например при сборке урожая или при движении в условиях недостаточной видимости^{64,65}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение МБРТК в строительную и дорожную отрасли иностранных государств явление более распространенное, чем в Российской Федерации. Хотя обзор литературы позволяет сделать вывод о том, что мобильные беспилотные роботизированные комплексы гражданского назначения – одна из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации.

Зарубежные автопроизводители ведут разработки МБРТК следующего назначения:

- автотранспортные средства двойного назначения;
- техника для охраны территорий по периметру (передвижные средства охраны и наблюдения);
- строительно-дорожные машины (бульдозеры, экскаваторы, грейдеры, краны и т.д.);
- техника для чрезвычайных ситуаций (машины скорой помощи, спецтехника, пожарные машины, внедорожные транспортные средства и т.д.);
- техника для обеспечения спортивных мероприятий на кортах для гольфа, в парках и т.п. [7].

Можно отметить ряд причин, по которым на данный момент невозможно повсеместное внедрение колонн МБРТК на дорогах общего пользования. К таким причинам относят: сложность внедрения МБРТК в существующую структуру дорожного транспорта; предотвращение столкновений между МБРТК и автомобилями с водителями; недостаточную надежность работы датчиков оперативного реагирования на меняющиеся погодные и дорожные условия (скольжения и повороты).

Несмотря на многообразие роботизированных комплексов, видимые различия в их устройстве, принципах работы и функциональном назначении, можно выделить ряд общих элементов, являющихся основой мобильных беспилотных роботизированных комплексов, которые в самом общем виде можно объединить в блоки:

1. Система навигации и позиционирования.
2. Информационная система.
3. Управляющая система.
4. Исполнительная система [9].

Приведенный в статье обзор МБРТК еще раз подтвердил, что современная робототехника сегодня способна решать очень разные задачи. Внедрение роботизированных комплексов в гражданскую промышленность способно вывести на новый уровень не только

⁶⁴ Беспилотный трактор прошел тесты на полях в России. Режим доступа: <https://iz.ru/news/617516> (дата обращения: 21.12.2018).

⁶⁵ Agrobot беспилотный трактор. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 13.02.2019).

производительность и качество продукции, но и значительно улучшить условия труда, повысив уровень безопасности на рабочем месте работников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нгуен Т.Н., Голь С.А., Погудаев А.А. Аппаратное обеспечение беспилотной системы управления автомобилем с механической коробкой передач // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4 (вып. 46) Ч.3. С.12–18.

2. Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Выбор методики разработки программного обеспечения для роботов-манипуляторов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 2. С. 46–51.

3. Нагайцев М.В., Сайкин А.М., Ендачёв Д.В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 5 (76). С. 32–39.

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158. Pp. 416–420. DOI: <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.80>.

5. Колтыгин Д.С. Седельников И.А. Классификация систем управления робототехническими комплексами // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 1. С. 71–73.

6. Черепанов П.Ю., Романов П.А. Основные направления развития робототехники // Современные инновации. 2017. № 1 (15). С. 29–38.

7. Горячев О.В., Фимушкин В.С., Чуканов К.П. Мобильные сухопутные робототехнические комплексы – основные определения и классификационные признаки, направления и проблемы в создании и применении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 12. Ч. 4. С. 139–151.

8. Половко С.А., Попов А.В. Перспективы применения гибридных групп мобильных роботов специального назначения // Экстремальная робототехника. 2018. С. 25–33.

9. Meshcheryakov V.A., Denisov L.A. Computer-aided design of the fuzzy control system using the genetic algorithm // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. Ст. 7819000. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819000

REFERENCES

1. Nguen T.N., Gol' S.A., Pogudaev A.A. Apparatnoe obespechenie bespilotnoj sistemy upravlenija avtomobilem s mehanicheskoj korobkoj peredach [Hardware of pilotless control system of the car with mechanical gear box]. *Vestnik rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013; 4 (vyp. 46) Ch.3: 12–18 (in Russian).

2. Koltigin D.S., Sedel'nikov I.A. Vybora metodiki razrabotki programmnoho obespechenija dlja robotov-manipuljatorov [Choice of the software development technique for robotic manipulators]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2017; T. 2: 46–51 (in Russian).

3. Nagajcev M.V., Sajkin A.M., Endachjov D.V. "Bespilotnye" avtomobili - jetapy razrabotki i ispytanij [Pilotless cars: development stages and tests]. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. 2012; 5 (76): 32–39 (in Russian).

4. Korchagin P.A., Letopolskiy A.B., Teterina I.A. Result of research of working capability of refined pipelayer. Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): proceedings of the international conference, Irkutsk, Russia, 21-26 may 2018 Volume 158. Pp. 416-420. DOI: <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.80>.

5. Koltigin D.S. Sedel'nikov I.A. Klassifikacija sistem upravlenija robototekhnicheskimi kompleksami [Classification of control systems of robotic complexes]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2016; T. 1: 71–73 (in Russian).

6. Cherepanov P.Ju., Romanov P.A. Osnovnye napravlenija razvitija robototekhniki [Main directions of the robotics' development]. *Sovremennye innovacii*. 2017; 1 (15): 29–38 (in Russian).

7. Gorjachev O.V., Fimushkin V.S., Chukanov K.P. Mobil'nye suhoputnye robototekhnicheskie komplekсы - osnovnye opredelenija i klassifikacionnye priznaki, napravlenija i problemy v sozdanii i primenenii [Mobile overland robotic complexes: main definitions and classification signs, the directions and problems in creation and application]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2016; 12. Ch. 4: 139–151 (in Russian).

8. Polovko S.A., Popov A.V. Perspektivy primenenija gibridnyh grupp mobil'nyh robotov special'nogo naznachenija [Prospects of the hybrid groups' use of special purpose mobile robots]. *Jekstremal'naja robototekhnika*. 2018: 25–33 (in Russian).

9. Meshcheryakov V.A., Denisov L.A. Computer-aided design of the fuzzy control system

using the genetic algorithm. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. St. 7819000. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819000

Поступила 26.03.2019 , принята к публикации 27.08.2019.

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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Артеменко Максим Николаевич – инженер, Сотое военное представительство, г. Омск, ORCID 0000-0003-0596-3888 (644021, г. Омск, Б.Хмельницкого, 226).

Корчагин Павел Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Подъемно-транспортные, тяговые машины и гидропривод», ФГБОУ ВО «СибАДИ» ORCID 0000-0001-8936-5679 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

Тетерина Ирина Алексеевна – канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела ФГБОУ ВО «СибАДИ» ORCID 0000-0001-8012-8511 (644080, г. Омск, e-mail: iateterina@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim N. Artemenko – Engineer, Omsk Military Representation Number Hundred, ORCID 0000-0003-0596-3888 (644021, Omsk, 226, Khmelniysky Blvd.).

Pavel A. Korchagin – Doctor Of Technical Sciences, Professor of the Department of Hoisting and Transport Machines and Hydraulic Actuators, Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID 0000-0001-8936-5679 (644080, Omsk, 5, Mira Ave.).

Irina A. Teterina – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID 0000-0001-8012-8511 (644080, Omsk, e-mail: iateterina@mail.ru).

ВКЛАД АВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия в теоретические разделы статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Each author has equal share in theoretical sections of the manuscript.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

НОВЫЙ ПОДХОД К ВВОДУ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛЕВОПОВОРОТНОЙ СЕКЦИИ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

А.П. Жигаadlo¹, С.В. Дорохин², Д.В. Лихачев^{2*}

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

²Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия

* lihachev_dv@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена исследованию методов ввода дополнительной левоповоротной фазы регулирования, даны основные зарубежные и отечественные методы, используемые при специализации левого поворота в отдельную фазу регулирования. Исследован один из наиболее нагруженных перекрестков г. Воронежа, установлены основные характеристики транспортного потока, в результате выполненного научного анализа предлагается использование нового подхода к специализации левоповоротного направления в отдельную фазу регулирования. Определены новые параметры, подлежащие учету, при выборе необходимого способа организации движения на регулируемых перекрестках.

Методы и материалы. Основные методы, существующие сегодня, условно отнесены к двум подходам – аварийности участка и характеристики транспортного потока (скорости движения и интенсивности левоповоротного потока). Применение нового подхода с учетом ранее не учитываемых параметров (скорости движения, задержки транспортных средств и длины очереди) позволяет наиболее эффективно управлять перекрестком за счет оптимального выбора необходимого способа организации движения в результате изменения рассматриваемых параметров при сочетании интенсивности левоповоротного потока и прямого конфликтующего потока.

Результаты. Авторами разработан подход к вводу дополнительной левоповоротной секции на регулируемом перекрестке, основанный на сопоставлении интенсивностей левоповоротного и прямого конфликтующего потока и анализа изменения основных характеристик транспортного потока (скорости движения, задержек транспортных средств и длины очереди).

Заключение. Сделан вывод о необходимости использования предлагаемого подхода на стадии моделирования, проектирования и реорганизации регулируемого участка на основании изменения основных характеристик транспортного потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: светофорное регулирование, характеристики транспортного потока, специализация левого поворота, эффективность.

© А.П. Жигаadlo, С.В. Дорохин, Д.В. Лихачев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

NEW APPROACH TO ADDITIONAL LEFT-TURN SECTIONS OF THE TRAFFIC SIGNAL REGULATION

A.P. Zhigadlo¹, S.V. Dorokhin², D.V. Likhachev^{2*}

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

²Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

* lihachev_dv@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper describes methods of using the additional left-turn phase of regulation. The authors view the main foreign and domestic methods used in the specialization of the left turn in a separate phase of regulation. To propose a new approach to the specialization of the left-turn direction in a separate phase of regulation the authors investigate one of the most loaded intersections in Voronezh and determine the main characteristics of the traffic flow. Therefore, the authors suggest new parameters in choosing of the necessary method of traffic organization at controlled intersections.

Methods and materials. The paper analyses the main methods, which were conditionally related to two approaches: the accident rate of the site and the characteristics of the traffic flow (speed and intensity of the left-turn flow). The authors explained that the new approach, which took into account such parameters as speed, vehicle delays and queue length, allowed effectively controlling the intersection due to the optimal choice of the necessary traffic organization method and due to the result of changes in the parameters by combining the intensity of the left-turn flow and forward flow.

Results. The authors developed the approach to the additional left-turn section introduction at the controlled intersection based on a comparison of the left-turn intensity and forward flow and on the analysis of changes in the main characteristics of the traffic flow (speed, vehicle delays and queue length).

Discussion and conclusions. The authors concluded that it is necessary to use the proposed approach at the stage of modeling, design and reorganization of the regulated area on the basis of changes in the main characteristics of the traffic flow.

KEYWORDS: traffic light regulation, traffic flow characteristics, left turn specialization, efficiency.

© A.P. Zhigadlo, S.V. Dorokhin, D.V. Likhachev



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

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня на регулируемых пересечениях довольно часто наблюдаются аварийные ситуации. Зачастую это связано с высоким уровнем автомобилизации, который характерен для многих стран, в том числе для Российской Федерации. Рассматривая 7-летний период (2009–2015 гг.), представленный на официальном сайте IRTAD¹, можно сказать, что Российская Федерация не занимает лидирующих позиций по уровню автомобилизации (таблица 1), но тем не менее она занимает одно из лидирующих мест по уровню аварийности [1].

Таблица 1
Показатели уровня автомобилизации на 1000 жителей по данным IRTAD 2009–2015 гг.

Table 1
Indicators of the motorization level per 1000 people according to IRTAD in 2009–2015

Страна \ Год	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Австралия	556	557	558	559	562	567	570
Австрия	514	521	529	535	541	543	545
Бельгия	481	484	489	489	491	495	498
Швейцария	518	521	526	532	534	535	538
Чешская Республика	423	423	428	436	448	449	458
Германия	505	510	517	534	529	541	545
Испания	474	475	477	476	472	474	482
Россия ²	219	228	242	257	273	283	288
Финляндия	520	536	553	565	575	585	594
Франция	478	479	481	481	479	477	477
Великобритания	467	467	464	465	468	472	479
Греция	462	469	469	468	467	469	472
Венгрия	301	301	298	301	307	315	325
Исландия	644	645	646	655	658	663	683
Израиль	263	272	282	287	293	302	311
Италия	615	620	625	623	614	609	614
Япония	452	453	456	460	467	472	478
Корея	254	264	274	283	290	299	311
Литва	546	560	577	602	619	414	432
Люксембург	661	654	651	651	655	653	654
Нидерланды	456	459	463	469	471	470	471
Польша	432	453	476	492	510	526	545
Словения	512	520	520	522	521	522	527
Швеция	460	459	459	467	468	473	476

В большинстве своем аварии на регулируемых перекрестках происходят в связи с неэффективной схемой организации, а именно в несогласованном распределении времени разрешающих и запрещающих тактов управления. Особое внимание в данном вопросе стоит уделить способам ввода дополнительной левоповоротной секции. В связи с этим выполнен детальный обзор существующих подходов к выделению специализированной левоповоротной полосы для выделенной фазы регулирования (дополнительная секция левого поворота).

¹ Официальный сайт International Traffic Safety Data and Analysis Group (IRTAD). URL: <https://www.itf-oecd.org/IRTAD>

² Официальный сайт Федеральной государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru/>

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно анализу зарубежной литературы сегодня существует несколько методов, позволяющих определить необходимость ввода дополнительной левоповоротной секции, условно их можно разделить на следующие подходы:

1. Подходы, основанные на риске возникновения дорожно-транспортных происшествий [2]. Согласно данному подходу, специализированные фазы левого поворота стоит вводить, если на перекрестке (участке дорожной сети) произошло более четырёх аварий, связанных с поворотом налево за последние 12 месяцев. Нерациональность использования данного подхода заключается в том, что не рассматриваются основные характеристики транспортного потока, которые определены в подходах, относящихся ко второй группе.

2. Подходы, основанные на анализе основных характеристик транспортного потока. Данные подходы созданы на сопоставлении входящей и встречной интенсивности движения, средней скорости движения и процента поворота налево (таблица 2).

В дальнейшем подходы, относящиеся ко второй группе, были усовершенствованы [4, 5], в связи с изменением технических параметров автомобилей изменялись рекомендации к процентному соотношению интенсивности левого поворота.

На основании выполненного анализа зарубежной литературы и полученных сведений в данной области представлены основные ре-

комендации по определению потенциальной потребности в специализированной фазе регулирования (рисунок 1).

Существуют различные руководящие принципы, разработанные для указания условий, когда преимущества от фазы поворота налево обычно перевешивают ее неблагоприятное воздействие на пересечения. Многие из этих принципов указывают на то, что фаза поворота налево может быть оправдана на основе рассмотрения нескольких факторов, которые в конечном итоге связаны с полученными эксплуатационными преимуществами или преимуществами безопасности.

Эти факторы включают в себя:

1. Процент поворота налево и интенсивность встречного движения.
2. Количество встречных полос.
3. Длину цикла.
4. Скорость встречного движения.
5. Видимость.
6. Количество аварий.

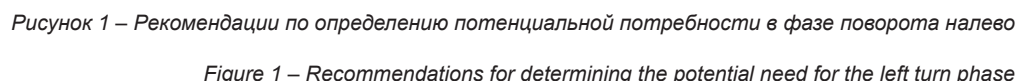
Схема, показанная на рисунке 1, может использоваться для определения того, нужна ли фаза левого поворота или нет. Применение схемы требует отдельной оценки каждого движения налево на дороге.

Задача схемы состоит в том, чтобы определить наименее ограничительный режим поворота налево. Вторичная цель – предоставить структурированную процедуру для оценки поэтапного поворота налево с целью обеспечения согласованности при применении в фазе поворота налево.

Таблица 2
Руководство AASHTO для полос поворота налево на двухполосных дорогах [3]

Table 2
AASHTO manual for left turn lanes on two-lane roads [3]

Рабочая скорость движения (миль/ч)	Встречная интенсивность (авт. -ч)	Входящая интенсивность (авт.- ч)			
		5% поворотов налево	10% поворотов налево	20% поворотов налево	30% поворотов налево
40	800	330	240	180	160
	600	410	305	225	200
	400	510	380	275	245
	200	640	470	350	305
	100	720	515	390	340
50	800	280	210	165	135
	600	350	260	195	170
	400	430	320	240	210
	200	550	400	300	270
	100	615	445	335	295
60	800	230	170	125	115
	600	290	210	160	140
	400	365	270	200	175
	200	450	330	250	215
	100	505	370	275	240



Количество критических аварий при повороте налево, показанное на рисунке 1, основано на базовой средней критической частоте аварий и учитывает внутреннюю изменчивость данных об авариях. Базовые значения аварий составляют 3 аварии в год. Если сообщенное число аварий для существующей разрешающей операции превышает критическое значение, то вероятно, что пересечение объекта имеет среднюю частоту аварий при повороте налево, которая превышает вышеупомянутое среднее значение (вероятность ошибки 5%), и более ограниченный режим работ возможно улучшит безопасность маневра при повороте налево.

Схема имеет два альтернативных пути после проверки скорости встречного движения. Один путь требует знания задержки поворота налево, другой – знания интенсивности поворота налево и интенсивности встречного движения. Задержка поворота налево, указанная в схеме, представляет собой задержку, возникающую, когда фаза поворота налево не предусмотрена (то есть движение налево осуществляется в разрешающем режиме).

На основании полученной информации можно сказать, что в зарубежных источниках существует ряд подходов, которые необходимо применять при выборе рациональной схемы организации движения на регулируемом участке, в частности при выделении специализированной фазы левого поворота.

В ходе анализа научных отечественных источников³ [6, 7, 8] установлены основные параметры, используемые при вводе рассматриваемого способа организации движения на регулируемом участке. Расчет светофорного цикла, а именно ввод левоповоротного обособленного направления (левоповоротной секции) на пересечении, осуществляется в соответствии с нормативными документами^{4,5}.

В соответствии с требованиями пропускная способность левого поворота зависит от интенсивности основного потока. Пропуск левого поворотного потока (количество автомобилей) пропорционален интенсивности встречного направления. Левоповоротный поток рекомендуется пропускать на просачивание через встречный прямой поток, от которого зависит

длительность основных тактов, если его интенсивность не превышает 120 авт.-ч. Если интенсивность левого поворотного потока больше 135 ед./ч (120 авт.-ч), то рекомендуется вводить III фазу или использовать другие методы организации дорожного движения по отнесению левого поворота из зоны пересечения автомобильных дорог (рисунок 2).

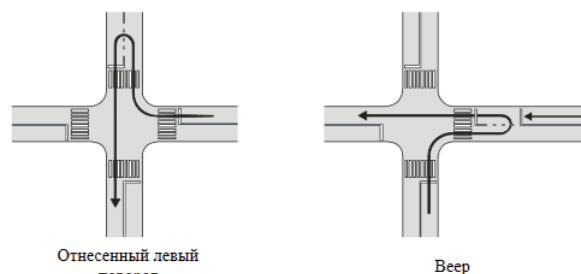


Рисунок 2 – Пример выноса левого поворота из зоны пересечения автомобильных дорог

Figure 2 – Example of removal of the left turn from the intersection

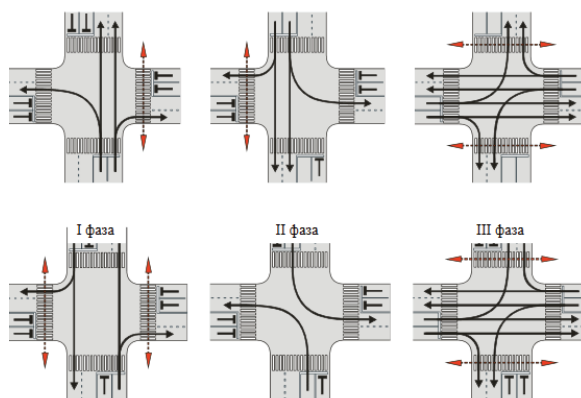


Рисунок 3 – Светофорное регулирование на пересечении автомобильных дорог с обеспечением пропуска транспортного потока с частичным конфликтом через пешеходный поток

Figure 3 – Traffic light regulation on the intersection with the passage of traffic flow and with a partial conflict through the pedestrian flow

В случаях с частичным конфликтом пропускать транспортный поток на «просачивание»

³ Левашев А.Г. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Проектирование регулируемых пересечений: учебное пособие. Иркутск : Изд-во Ир ГТУ, 2007. С. 208.

⁴ ОДМ 218.6.003–2011 Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). М., 2013. С. 69.

⁵ ГОСТ Р 52282–2004 Технические средства организации дорожного движения. Светофоры дорожные. Типы и основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний.

через пешеходный поток, возможно, при интенсивности транспортного потока, не превышающего 120 авт.-ч, интенсивность пешеходного потока 900 чел.-ч (рисунок 3).

С целью анализа основных параметров транспортного потока и разработки специализированного подхода к выбору рациональной схемы организации движения на регулируемом перекрестке г. Воронежа выполнены натурные обследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа рассматриваемого способа организации левого поворота в зоне регулируемого перекрестка – выделение специализированной полосы и организация движения в специализированной фазе регулирования – определен участок УДС бульвар Победы – улица Антонова-Овсенко (рисунок 4).



Рисунок 4 – Спутниковый снимок участка УДС бульвар Победы – улица Антонова-Овсенко (г. Воронеж)

Figure 4 – Satellite photo of the UDS Pobeda Avenue and Antonova-Ovsenko Street (Voronezh)

Рядом с перекрестком расположены авто-рынок «Северный», гаражно-строительный кооператив, фитнес-клуб «Колизей», остановочные комплексы, несколько мелких магазинов, которые являются центрами притяжения транспортных и пешеходных потоков. Нали-

чие центров притяжения создает вероятность возникновения заторов и ДТП с участием пешеходов.

Состояние проезжей части бульвара Победы и улицы Антонова-Овсенко удовлетворительное, для движения пешеходов имеются тротуары. Освещение улиц выполнено люминесцентными лампами на железных опорах. Геометрическая характеристика объекта является основой для проведения всех натуральных обследований транспортной характеристики.

На сегодняшний день движение транспортных средств налево осуществляется без выделения специализированной фазы регулирования и ввода дополнительной секции светофора (левоповоротная секция).

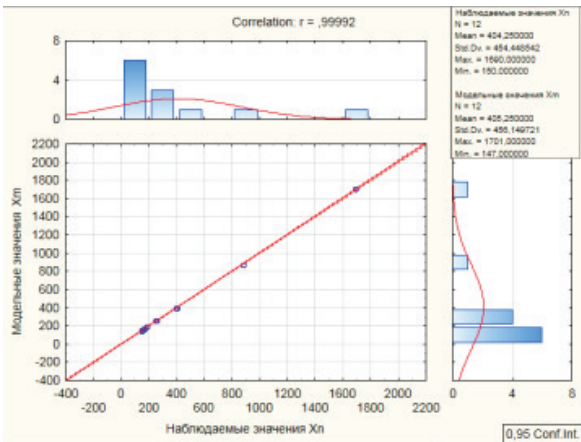
В ходе натурных обследований установлено, что наибольшее количество транспортных средств проезжает исследуемый перекресток в пятницу в среднем 4864 ед./ч, по входному направлению для левого поворота – 108 ед./ч. Количество циклов за час на пересечении – 26.

На основании ранее выполненного литературного обзора отмечено, что необходим учет дополнительных параметров при организации специализированного левоповоротного движения при использовании светофорного управления. Введение данного мероприятия (специализированного левого поворота) должно быть необходимым и оправданным, потому что для всего рассматриваемого транспортного потока увеличивается время ожидания разрешающего сигнала. В связи с этим в рамках исследования были рассмотрены новые параметры, оказавшие влияние на ввод дополнительной левоповоротной секции – задержки ТС, скорость движения ТС и длина очереди ТС.

Данные параметры были определены в специализированном программном продукте Aimsun⁶.

Прежде чем получить исследуемые моделируемые параметры, определим адаптивность разработанной транспортной модели с помощью анализа корреляции модельных значений с данными, полученными в результате обработки видеоматериалов исследований [9]. При помощи программного комплекса STATISTIKA, предназначенного для проведения статистического анализа, определим коэффициент корреляции наблюдаемых значений (X_n) и модельных значений (X_m) (рисунок 5).

⁶ Aimsun Version 7.0. (R10631). Copyright (C) 1997–2011 TSS-Transport Simulation Systems.



Variable	Модельные значения X_m	Наблюдаемые значения X_n
Модельные значения X_m	1,000000	0,981745
Наблюдаемые значения X_n	0,981745	1,000000

Рисунок 5 – Определение коэффициента корреляции

Figure 5 – Determination of correlation coefficient

Корреляционный анализ позволил выявить статистические зависимости между натурными и модельными параметрами интенсивности (см. рисунок 5). Параметры интенсивности модельные (X_m) коррелируют с наблюдаемыми значениями (X_n). Коэффициент корреляции Пирсона $r_{xy} = 0,98$ (на уровне значимости 5%). Так как $r_{xy} > 0,9$, корреляционная связь считается прямой и весьма высокой, следовательно, построенная транспортная модель является адаптивной в использовании и на ней можно проводить исследования.

Моделирование объекта исследования – бульвара Победы – улицы Антонова-Овсеенко (см. рисунок 4) – показало, что среднее значение условной задержки транспортных средств, движущихся налево за 26 циклов, составило 308,52 с (5 мин 14 с). Максимальная транспортная задержка составляет 9 мин, минимальная 1 мин 5 с (рисунок 6).

Анализ скоростей движения показал, что средняя скорость транспортных средств, осуществляющих поворот налево за 26 циклов, составила 20,9 км/ч (рисунок 7). Наибольший

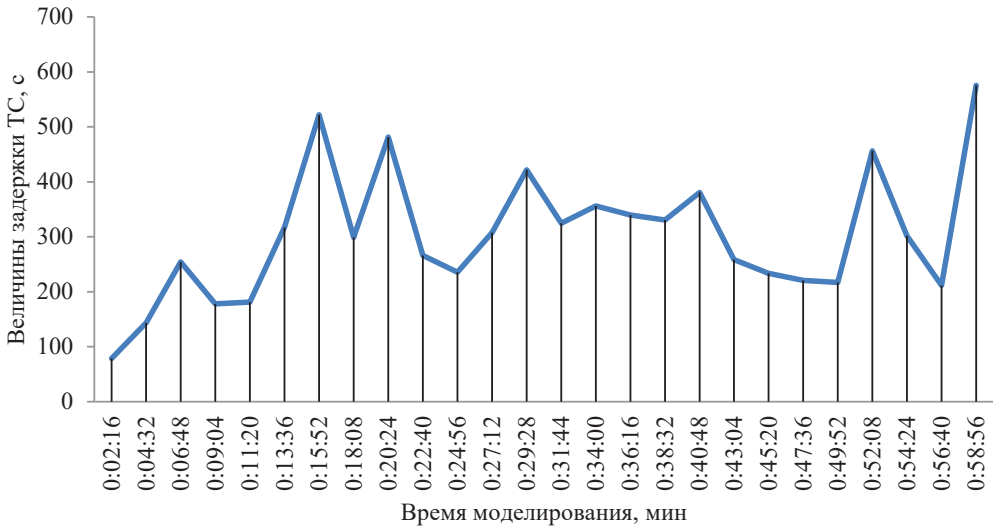


Рисунок 6 –Изменение величины задержки транспортных средств на объекте исследования

Figure 6 –Change in the value of vehicle delay at the research object

показатель скорости транспортных средств при проезде по рассматриваемому направлению составил 45 км/ч, наименьший 25 км/ч.



Рисунок 7 – Изменение средней скорости движения левоповоротного направления в каждом цикле

Figure 7 – Change in the average speed of the left-turn direction in each cycle

В ходе моделирования установлено, что средняя максимальная длина очереди транспортных средств, движущихся налево за 26 циклов, составляет 69 авт. (рисунок 8).

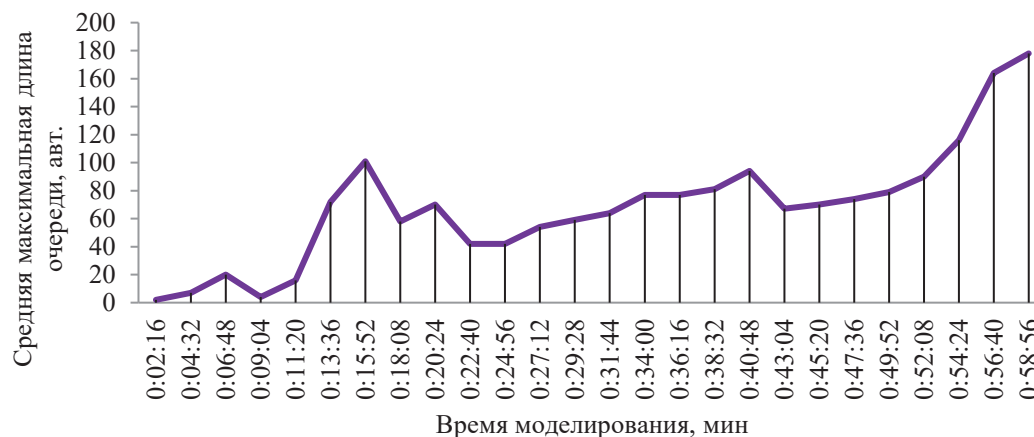


Рисунок 8 – Средняя максимальная длина очереди ТС левоповоротного направления в каждом цикле

Figure 8 – Average maximum queue length of the left-turn in each cycle

В результате исследования регулируемого перекрестка были определены основные транспортные характеристики для транспортных средств, осуществляющих поворот налево. Установлено, что на рассматриваемом объекте исследования наблюдаются заторовые ситуации, которые выражаются в высоких значениях длины очереди и задержек. В связи с полученными результатами предлагается разработать подход к выбору специализации левоповоротной полосы с учетом изменения исследуемых параметров.

На основании сопоставления интенсивности левоповоротного потока (N_1) и интенсивности прямого конфликтующего потока (N_2) определены значения исследуемых параметров (задержек ТС, длины очереди и скорости движения) (рисунки 9, 10, 11).

Минимальное значение задержек транспортных средств составляет 2,77 с при соотношении $N_1 = 50$ ед./ч к $N_2 = 250$ ед./ч, максимальное значение составляет 2644,97 с при соотношении $N_1 = 50$ ед./ч к $N_2 = 3000$ ед./ч, а среднее значение задержки – 918,19 с. В большинстве соотно-

шений интенсивностей N_1 и N_2 задержки в модели имеют прямую зависимость и выраженную восходящую тенденцию с коррекцией вниз и локальным максимумом задержек 756,98 с при соотношении $N_1 = 1000$ ед./ч к $N_2 = 750$ ед./ч (см. рисунок 9).

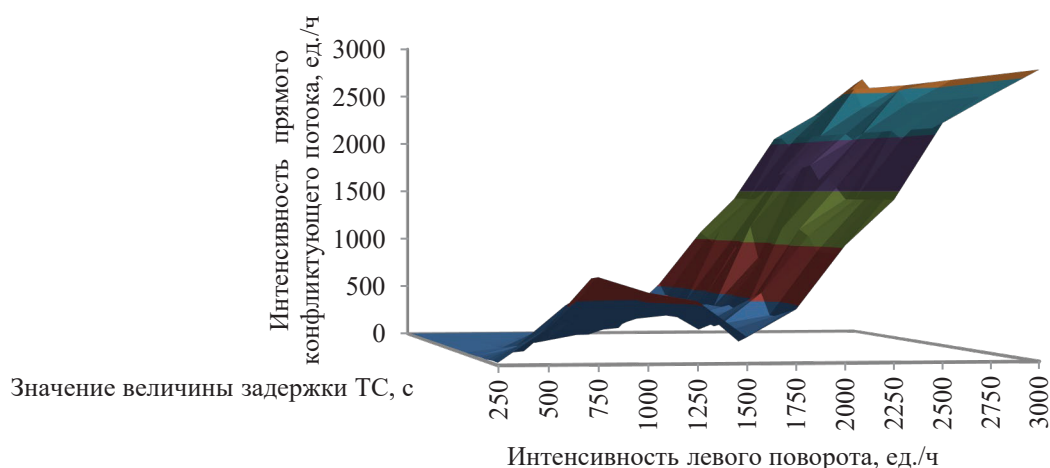


Figure 9 – Change in delay with N_1 to N_2 intensity ratio

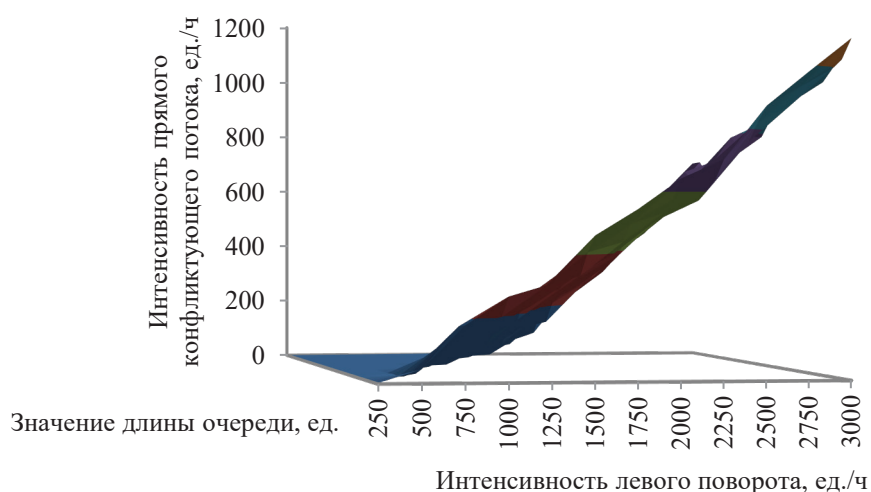


Figure 10 – Change in the queue length with N_1 to N_2 intensity ratio

Минимальное значение длины очереди транспортных средств составляет 0,47 авт. при отношении $N_1 = 50$ ед./ч к $N_2 = 250$ ед./ч, максимальное значение составляет 1087,4 авт. при отношении $N_1 = 1000$ ед./ч к $N_2 = 3000$ ед./ч, а среднее значение длины очереди ТС – 918,19 авт. В большинстве соотношений интенсивностей N_1 и N_2 длина очереди в модели имеет прямую зависимость и выраженную восходящую тенденцию (см. рисунок 10).

Аналогичным образом получено изменение скорости движения (см. рисунок 11).

В зависимости от того, какие параметры наблюдаются на объекте исследования, можно определить необходимый способ организации левого поворота в результате дифференциации параметров по уровню обслуживания⁷.

⁷ ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог.

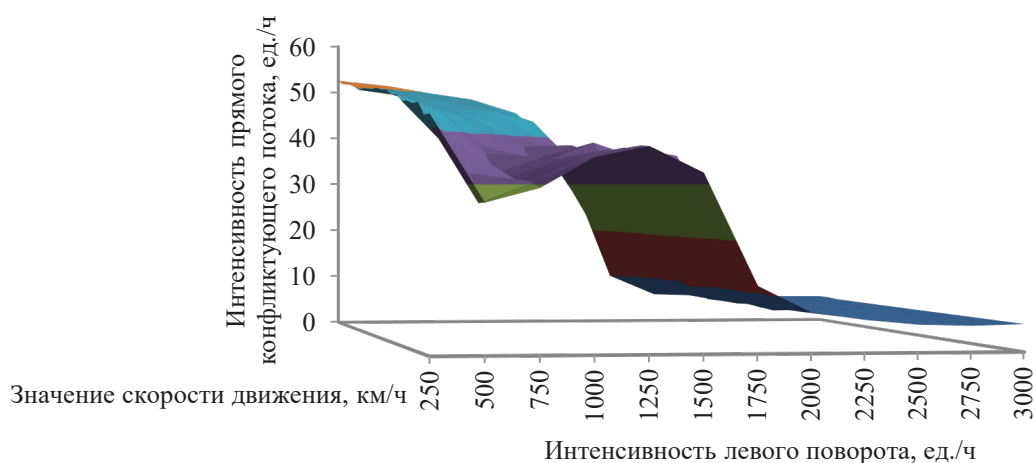


Рисунок 11 – Изменение скорости при отношении интенсивностей N_1 к N_2

Figure 11 – Change in velocity with N_1 to N_2 intensity ratio

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате использования подхода по оценке изменения основных характеристик транспортного потока на объекте исследования предлагается ввод дополнительной фазы регулирования для левоповоротного направления. Данное изменение способа организации движения на перекрестке будет способствовать изменению основных характеристик транспортного потока (таблица 3).

Установлено, что при внедрении нового способа организации левого поворота ситуация на анализируемом объекте исследования улучшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследований были определены основные параметры, подлежащие учету при анализе левоповоротного движения на регулируемом участке. Анализ изменения характеристик транспортного потока левоповоротного движения и прямого конфликтующего потока позволил получить значения длины очереди, скорости движения и задержки транспортных средств. В результате исследований рассматриваемых параметров для каждого значения был установлен уровень обслуживания, согласно которому возможно на стадии проектирования, реорганизации или моделирования⁸ определить необходимый

Таблица 3
Показатели транспортного потока до и после реорганизации существующей схемы ОДД

Table 3
Traffic flow indicators before and after the reorganization of the existing ODD scheme

Характеристика транспортного потока	Показатели транспортного потока при существующей схеме ОДД	Показатели транспортного потока после реорганизации существующей схемы
Задержки, с	308,52	229,84
Скорость, км/ч	20,9	23,4
Длина очереди, ед.	69	32

⁸ Витвицкий Е.Е. Моделирование транспортных процессов // В сборнике : Образование. Транспорт. Инновации. Строительство / Сборник научных трудов национальной научно-практической конференции. 2018. С. 212–219.

способ организации движения левоповоротного потока на регулируемом перекрестке. Кроме этого, возможно использование полученных результатов и предлагаемого способа при построении архитектуры интеллектуальных транспортных систем [10, 11, 12, 13, 14].

Выполненный модельный эксперимент позволил оценить изменение основных параметров транспортного потока на регулируемом участке (объекте исследования) при использовании необходимого способа организации движения левоповоротного потока (специализации в фазе регулирования), повысить скорость движения на 11% и снизить задержки транспортных средств и длину очереди на 34% и 115% соответственно, что в целом повышает пропускную способность исследуемого участка и подтверждает целесообразность выполненных мероприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Martin A., Lagarde E., Salmi L.R. Burden of road traffic injuries related to delays in implementing safety belt laws in low- and lower-middle-income countries. *Traffic Injury Prevention*. 2018. Т. 19. pp. S1-S6.
2. Asante S.A., S.A. Ardekani, and J.C. Williams. «Selection Criteria for Left-Turn Phasing, Indication Sequence and Auxiliary Sign». HPR Research Report 1256- IF, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, February 1993. pp. 105.
3. Traffic Signal Preemption for Emergency Vehicles: A Cross-Cutting Study, Putting the First in First Response» FHWA, NHTSA, Washington D.C., January 2006.
4. Al-Kaisy, Ahmed & Freedman, Zachary. November 2005. Weather Responsive Signal Timing: Practical Guidelines. Paper submitted to the Transportation Research Board 85th Annual Meeting January 22–26, 2006.
5. Federal Highway Administration, Mitretek Systems. Best Practices for Road Weather Management. Version 2.0. City of Clearwater, Florida Weather-Related Signal Timing, 2010.
6. Цариков А.А. Пути повышения пропускной способности и безопасности движения поворотных маневров // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 3 (13). С. 31–36.
7. Цариков А.А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2009. № 3–4. С. 118–123.

8. Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография. М.: Логос, 2013. 188 с.

9. Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2 (25). С. 132.

10. 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.

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

12. 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. Т. 1015. p. 032128.

13. Дубынина М.Г., Жигadlo А.П. Влияние психофизиологических особенностей личности водителя на надежность управления транспортным средством // Вестник сибирского отделения академии военных наук. 2018. № 49. С. 119–130.

14. Дорохин В.Н., Жигadlo А.П., Соловьев А.А. Технологии умного города: монография. Омск, 2018.

REFERENCES

1. Martin A., Lagarde E., Salmi L.R. Burden of road traffic injuries related to delays in implementing safety belt laws in low- and lower-middle-income countries. *Traffic Injury Prevention*. 2018. Т. 19: S1–S6.
2. Asante S.A., S.A. Ardekani, and J.C. Williams. «Selection Criteria for Left-Turn Phasing, Indication Sequence and Auxiliary Sign». HPR Research Report 1256- IF, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, February 1993: 105.
3. Traffic Signal Preemption for Emergency Vehicles: A Cross-Cutting Study, Putting the First in First Response» FHWA, NHTSA, Washington D.C., January 2006.
4. Al-Kaisy, Ahmed & Freedman, Zachary. November 2005. Weather Responsive Signal Timing: Practical Guidelines. Paper submitted to the Transportation Research Board 85th Annual Meeting January 22–26, 2006.
5. Federal Highway Administration, Mitretek Systems. Best Practices for Road Weather

Management. Version 2.0. City of Clearwater, Florida Weather-Related Signal Timing, 2010.

6. Carikov A.A. Puti povysheniya propusknogo sposobnosti i bezopasnosti dvizheniya povorotnykh manevrov [Ways of increase in capacity and traffic safety of rotary maneuvers]. *Vestnik SibADI*. 2009; 3 (13): 31–36 (in Russian).

7. Carikov A.A. Razvitie metodov rascheta reguliruemym uzlov na ulichno-dorozhnoy seti [Development of the calculation methods of adjustable knots on a street network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2009; 3–4: 118–123 (in Russian).

8. Jakimov M.R. Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modelej gorodov: monografija [Transport planning: creation of transport models in the cities]. Moscow: Logos, 2013: 188 (in Russian).

9. Zyrjanov V.V. Metody ocenki adekvatnosti rezul'tatov modelirovaniya [Methods of the modeling results' adequacy]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2013; 2 (25): 132 (in Russian).

10. Zhankaziev S.V., Ivanov A.M., Vlasov V.M. Nauchnye podhody k formirovaniyu koncepcii postroeniya ITS v Rossii [Scientific approaches to formation of the ITS concept in Russia]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2010; 4: 2–8 (in Russian).

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

12. 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. T. 1015: 032128.

13. Dubynina M.G., Zhigadlo A.P. Vliyanie psichofiziologicheskikh osobennostey lichnosti voditelja na nadezhnost' upravleniya transportnym sredstvom [Influence of psycho physiological features of the driver on driving reliability]. *Vestnik Sibirskogo Otdeleniya Akademii Voennykh Nauk*. 2018; 49: 119–130 (in Russian).

14. Dorohin V.N., Zhigadlo A.P., Solov'ev A.A. *Tehnologii umnogo goroda*. Monografija [Technologies of the smart city]. Omsk, 2018 (in Russian).

Поступила 17.07.2018, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятель-

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жига́дло Александр Петрович – канд. техн. наук, д-р пед. наук, доц., ректор Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ), ORCID ID 0000-0002-8883-3167 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: rector@sibadi.org).

Дорохин Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доц., декан автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, ORCID ID 0000-0002-3869-9115 (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, e-mail: dsvvrn@yandex.ru).

Лихачев Дмитрий Валерьевич – заместитель декана автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, ORCID ID 0000-0001-5200-8387 (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, e-mail: lihachev_dv@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander P. Zhigadlo – Candidate of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Rector of the Siberian State Automobile and Highway University, ORCID ID 0000-0002-8883-3167 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: rector@sibadi.org).

Sergey V. Dorokhin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Automobile Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ORCID ID 0000-0002-3869-9115(394087, Voronezh, 8, Timiryazev St., e-mail: dsvvrn@yandex.ru).

Dmitry V. Likhachev – Dean Deputy of the Automobile Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ORCID ID 0000-0001-5200-8387(394087 Voronezh, 8, Timiryazev St., e-mail: lihachev_dv@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Жига́дло А.П. Выполнение аналитических исследований, постановка цели и задачи исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом.

Дорохин С.В. Разработка подхода к внедрению специализированной фазы регулирования с учетом ранее не используемых пара-

метров транспортного потока (скорости, задержки, длины очереди).

Лихачев Д.В. Анализ результатов полученных данных в ходе выполнения натурных исследований.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander P. Zhigadlo – analytical research; statement of the research aim; analysis and

acquaintance with foreign and domestic experience.

Sergey V. Dorokhin – development of approach to the specialized phase of regulation taking into account parameters of traffic flow (speed, delays, turn length).

Dmitry V. Likhachev – analysis of research results.

УДК 665.765

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С УВЕЛИЧЕННЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ ЗАМЕНЫ

Н.Ю. Мачехин¹, И.И. Ширлин², *С.В. Пашукевич^{3,4}

¹Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия;

²ООО «Газпромнефть – смазочные материалы»,
г. Москва, Россия;

³Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия;

⁴ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия.

*sofia96@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективная работа автомобилей во многом зависит от состояния двигателей, простоев их в техническом обслуживании и ремонте. Так как техническое обслуживание современных двигателей часто сводится к замене моторного масла, то увеличение продолжительности его работы значительно сокращает эксплуатационные затраты и простои в техническом обслуживании. Длительная безремонтная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания автомобильной техники непосредственно связана с состоянием моторного масла, применяемого в данном силовом агрегате. Основной причиной написания работы явилась необходимость показать особенности эксплуатации техники при значительных интервалах замены моторных масел с целью повышения эффективности её использования. В работе приведены данные об особенностях эксплуатации техники при использовании высококачественных моторных масел с увеличенными интервалами замены.

Материалы и методы. Эксплуатационные испытания проводились на базе автомобилей Mercedes-Benz Axiom, Mercedes-Benz Actros. Завод-изготовитель предоставил оценочные показатели работоспособности моторных масел для двигателей. Основные характеристики работоспособности моторных масел оценивались стандартными методами: кинематическая вязкость измерялась при помощи вискозиметра Штабенгера, щелочное число определялось автоматическим титратором AT-500, содержание продуктов износа было получено эмиссионным спектрофотометром со связанной плазмой ASP.

Результаты. Представлены данные о зависимости изменения основных показателей работоспособности моторных масел от наработки, а также обоснованы требования к объёмам доливаемых свежих моторных масел для восполнения потерь.

Обсуждение и заключение. Промежуточный контроль, описываемый в статье, позволяет выявить неисправности двигателей внутреннего сгорания автомобиля, а также дать наиболее точный прогноз о ресурсе рассматриваемого смазочного материала. Увеличение интервалов замены моторного масла позволяет получить значительный экономический эффект.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторные масла, смазочные материалы, кинематическая вязкость, кислотное число, щелочное число, двигатель внутреннего сгорания.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем искреннюю благодарность Сергею Васильевичу Корнееву, профессору, доктору технических наук, за помощь в написании статьи.

© Н.Ю. Мачехин, И.И. Ширлин, С.В. Пашукевич



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

USAGE OF HIGH-QUALITY ENGINE OILS WITH EXTENDED REPLACEMENT INTERVALS: FEATURES OF THE EQUIPMENT OPERATION

N.Y. Machekhin¹, I.I. Shirlin², *S.V. Pashukevich^{3,4}

¹Omsk Automobile and Armored Engineering Institute,
Omsk, Russia

²Gazpromneft,
Moscow, Russia

³Omsk State Technical University,
Omsk, Russia,

⁴Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia.

* sofia96@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. The effective operation of cars largely depends on the state of the engines, their downtime in maintenance and repair. Since the maintenance of modern engines is often reduced to the replacement of engine oil, the increase in the duration of its work significantly reduces maintenance costs and downtime in maintenance. Long maintenance-free operation of the internal combustion engines of automotive vehicles is directly related to the state of the engine oil used in this power unit. The aim of the paper is to show the features of the equipment operation with significant intervals of the engine oils' replacement in order to increase the efficiency of its usage. The paper presents data on the features of the equipment operation when using high-quality motor oils with extended replacement intervals.

Materials and methods. The authors conducted performance tests on the basis of MercedesBenzAxor, MercedesBenzActros cars. The manufacturer provided an estimate of the performance of engine oils. The main performance characteristics of motor oils were assessed using standard methods: kinematic viscosity was measured using a Stabinger viscosimeter, the base number was determined by an automatic AT-500 titrator, the content of wear products was obtained using an ASP-coupled emission spectrophotometer.

Results. As a result, the authors presented data on the dependence of the changes in the main indicators of engine oil performance while the operating time and also substantiated the requirements for the volumes of fresh engine oil to compensate losses.

Discussion and conclusions. The intermediate control allows detecting faults in the internal car engines, as well as providing the most accurate prediction of the resource of the lubricant under consideration. Therefore, the increasing of the engine oil change interval allows getting a significant economic effect.

KEYWORDS: motor oils, lubricants, kinematic viscosity, acid number, base number, internal combustion engine.

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their sincere gratitude to Sergey V. Korneev, Professor, Doctor of Technical Sciences, for his help in writing this manuscript.

© N.Y. Machekhin, I.I. Shirlin, S.V. Pashukevich



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

ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество техники и оборудования, используемого при добыче и переработке нефти и газа, требует для базового использования автомобильную технику, оснащённую двигателями внутреннего сгорания. Надёжность и долговечность двигателей внутреннего сгорания напрямую зависит от состояния моторных масел. Изменение свойств моторных масел в процессе использования определяет периодичность их замены. В настоящее время организации, эксплуатирующие технику, стремятся сокращать расходы за счёт увеличения сроков замены моторных масел. Данная тенденция диктуется производителями техники и смазочных материалов, которые регулярно пополняют ассортимент новыми высококачественными продуктами уровня свойств Super High Performance Diesel (SHPD) и Ultra High Performance Diesel (UHPD) [1, 2, 3].

Такой подход при одобрении производителя техники позволяет снизить эксплуатационные расходы за счёт снижения объёмов потребления смазочных материалов, снижения трудозатрат на замену смазочных материалов и фильтров, увеличивает коэффициент использования парка за счёт сокращения времени простоя техники при техническом обслуживании [4, 5, 6].

Однако увеличение интервалов замены без контроля технического состояния техники

и эксплуатационных свойств смазочного материала имеет определенные риски снижения надежности техники, связанные со скрытыми неисправностями узлов и агрегатов. Применительно к моторным маслам существует ряд неисправностей, которые приводят к резкому снижению эксплуатационных свойств смазочного материала и, как следствие, к повышенному износу деталей двигателя [7].

Кроме того, при эксплуатации техники на увеличенных интервалах замены неизбежно возникает необходимость компенсации расхода масла «на угар» и (или) в результате несвоевременно обнаруженных утечек при нарушении герметичности системы смазки. Доливки свежего масла сами по себе улучшают эксплуатационные свойства работающего смазочного материала, но при этом увеличивается риск смешения смазочных материалов разного качества и попадания внешних загрязнений при некачественном обслуживании техники в рейсах, а это уже негативно сказывается на эксплуатационных свойствах моторного масла и надежности двигателя [8, 9].

Таким образом, для уменьшения рисков снижения надежности двигателей автомобилей, которые эксплуатируются с увеличенными интервалами замены моторного масла, необходимо введение дополнительного промежуточного контроля (диагностики) состояния моторного масла и двигателя [10, 11, 12].

В подтверждение вышесказанного представлены полученные результаты эксплуа-

Таблица 1
Физико-химические характеристики масла g- profi gts 5w 30

Table 1
Physical and chemical characteristics of the oil g-Profi GTS 5W 30

Показатели	Значение	Метод
Вязкость кинематическая, мм ² /с при 40 °C при 100 °C		
	72,0	ASTM D 445
	12,1	ASTM D 445
Индекс вязкости	166	ASTM D 2270
Вязкость динамическая (CCS) при минус 30°C, мПа*с	6500	ASTM D 5293
Температура вспышки в открытом тигле, °C	231	ASTM D 92
Температура застывания, °C	-42	ASTM D 97
Плотность при 15 °C, кг/м ³	859	ASTM D 1298
Щелочное число, мг KOH/г	15,0	ASTM D 2896

Таблица 2
Физико-химические характеристики масла g- profi gts 10w 40

Table 2
Physical and chemical characteristics of the oil g-profi gts 10w 40

Показатели	Значение	Метод
Вязкость кинематическая, мм ² /с при 40 °С при 100 °С		
	91,4	ASTM D 445
	13,7	ASTM D 445
Индекс вязкости	152	ASTM D 2270
Вязкость динамическая (CCS) при минус 30°С, мПа*с	6650	ASTM D 5293
Температура вспышки в открытом тигле, °С	233	ASTM D 92
Температура застывания, °С	-37	ASTM D 97
Плотность при 15 °С, кг/м ³	866	ASTM D 1298
Щелочное число, мг КОН/г	16,0	ASTM D 2896

Таблица 3
Предельные значения показателей работающих масел

Table 3
Limit values of operating oils

№	Показатель	Нормативное значение
1	Изменение вязкости при 100 °С, мм ² /с (сСт)	9,3–12,5 (предел класса вязкости SAE 30) 12,5–16,3 (предел класса вязкости SAE 40)
2	Содержание топлива, %	не более 2,0
3	Общее щелочное число (TBN), не менее мгКОН/г	6,86 (5W-30) и 7,5 (10W-40) (50% от значения свежего масла)
4	Общее кислотное число TAN, мгКОН/г	не должно превысить значение TBN
Потенциальные загрязняющие вещества и металлы износа		
5	Кремний (Si), ppm	менее 40
6	Сажа, %	менее 3
7	Содержание воды, %	не более 0,2
8	Железо, ppm	не более 95
9	Алюминий, ppm	не более 16
10	Медь, ppm	не более 45
11	Свинец, ppm	не более 80

тационных испытаний парка техники с использованием моторного масла G-ProfiGTS, производства компании «Газпромнефть – смазочные материалы», соответствующего ACEAE4, E7, двух классов вязкости по SAE 5W-30 и SAE 10W-40 (характеристики данных масел представлены в таблицах 1 и 2).

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксплуатационные испытания проводились на базе автомобилей Mercedes-Benz Axor, Mercedes-Benz Actros, работающих по маршрутам междугородних перевозок в период с сентября 2017 по апрель 2018 года. Целью испытаний была оценка возможности

увеличения интервала замены моторного масла с 60 до 80 тыс. км в условиях эксплуатации техники. В ходе проведения эксплуатационных испытаний среднесуточная наработка автомобилей составила 319 – 420 км/сут, общая наработка автомобилей – от 46 до 79 тыс. км.

Оценка эксплуатационных свойств мотор-

ного масла производилась по динамике изменения показателей качества работающего моторного масла [13, 14, 15]. Критериями оценки основных эксплуатационных свойств были выбраны следующие показатели качества моторного масла: кинематическая вязкость при 100 °С, щелочное и кислотное числа, содержание

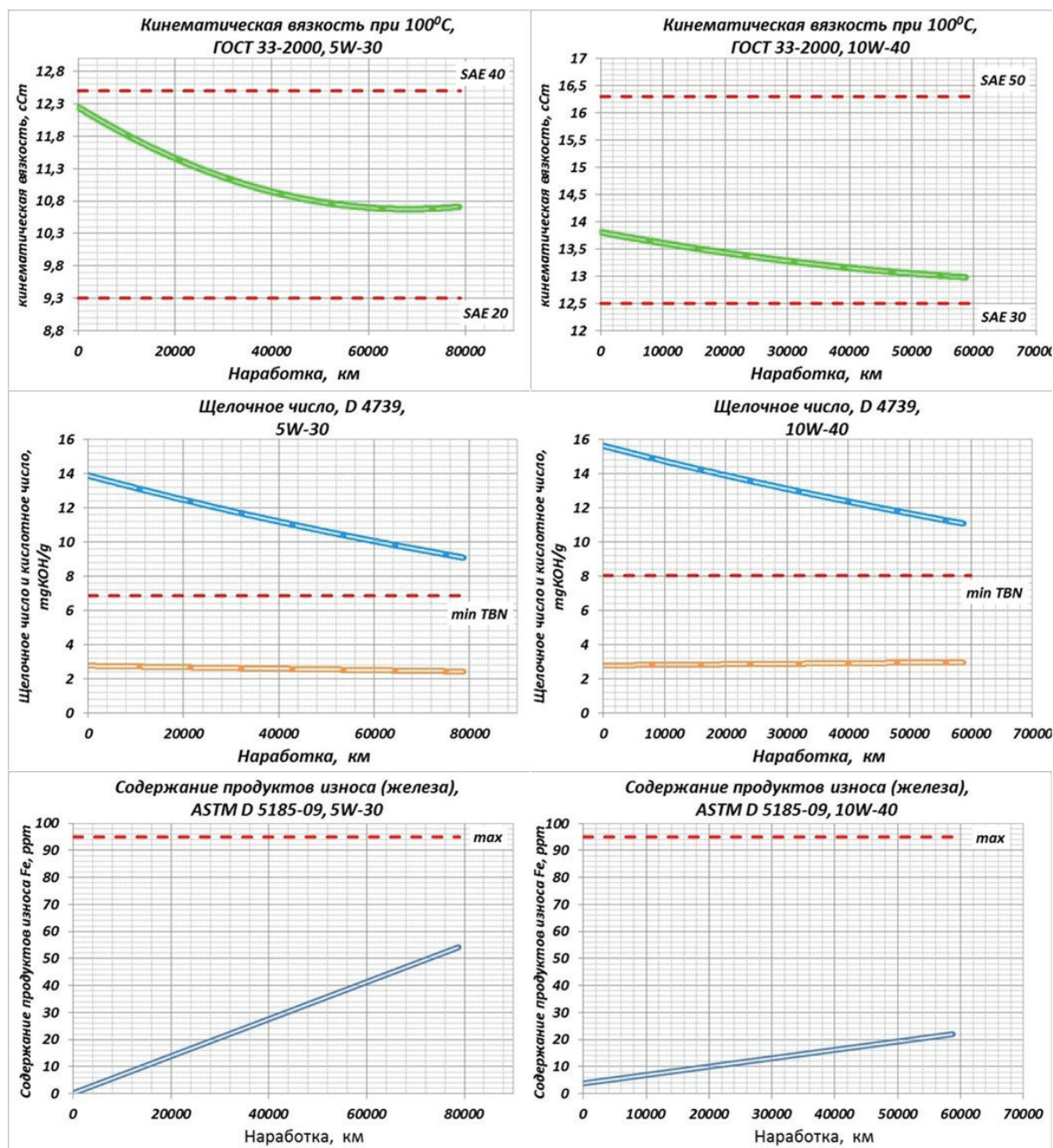


Рисунок 1 – Изменение основных показателей моторных масел в процессе эксплуатации

Figure 1 – Changes in the main indicators of engine oils during operation

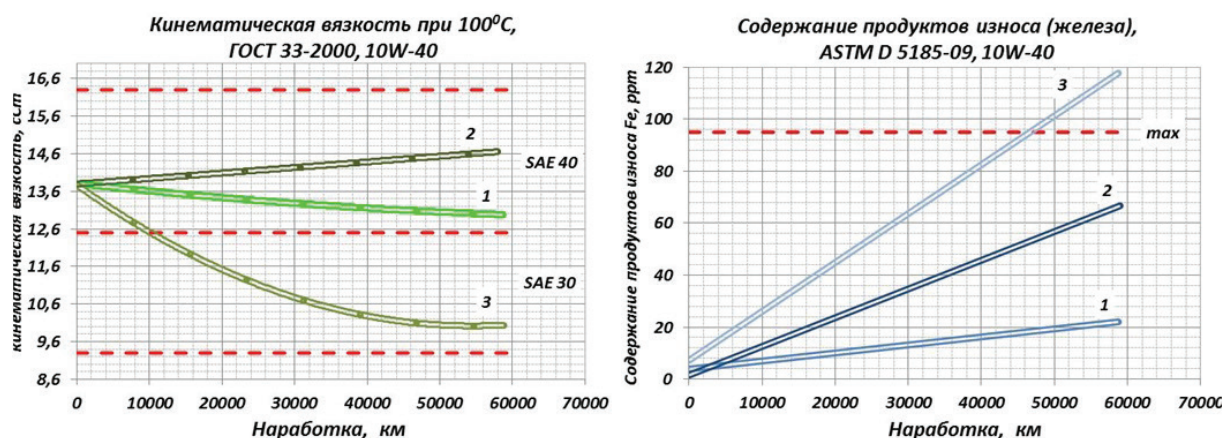


Рисунок 2 – Изменение показателей моторного масла при неисправностях системы питания двигателя:
1 – исправный двигатель; 2 – нарушение процесса сгорания (накопление сажи до 4,2 %);
3 – попадание топлива (попадание топлива до 3%)

Figure 2 – Change in engine oil performance while engine power system's faults:
1 – serviceable engine; 2 – violation of the combustion process (soot accumulation up to 4.2%);
3 – hit of fuel (hit of fuel to 3%)

элементов износа (железа) [16, 17]. Основные характеристики работоспособности моторных масел оценивались стандартными методами: кинематическая вязкость измерялась при помощи вискозиметра Штабенера, щелочное число было определено с помощью автоматического титратора AT-500, содержание продуктов износа в свою очередь было получено эмиссионным спектрофотометром со связанной плазмой ASP.

Техническое состояние подконтрольных автомобилей и смазочного материала диагностировалось по состоянию работающего моторного масла, отобранного из двигателей при пробеге 30, 40, 50, 60, 70 и 80 тыс. км с момента замены масла. Отобранные пробы исследовались в аккредитованной лаборатории.

Полученные результаты исследований сравнивались со значениями браковочных показателей (таблица 3) и оформлялись в виде зависимостей от наработки моторного масла (рисунок 1).

На основе анализа полученных данных (значения показателей качества работающих моторных масел находятся в пределах допустимых значений в течение рассматриваемых наработок) можно уверенно говорить о возможности подконтрольного увеличения периодичности замены моторного масла с 60 до 80 тыс. км.

Однако полученные зависимости справед-

ливы для автомобилей с исправными двигателями. В случае возникновения отклонений в работе отдельных систем происходит ухудшение эксплуатационных свойств моторных масел, что приводит к увеличению интенсивности износа деталей двигателей [18, 19, 20].

На рисунке 2 представлены сравнительные зависимости, полученные для проб масла с попаданием сажи и топлива.

Полученные данные подтверждают, что при повышении содержания сажи в моторном масле кинематическая вязкость при 100 °C начинает увеличиваться, а это приводит к снижению смазывающей способности, увеличению интенсивности износа деталей и, как следствие, содержание железа в масле к наработке 60 тыс. км становится в 3 раза больше по сравнению с исправным двигателем [21].

Однако большее влияние на изнашивание деталей двигателя оказывает попадание в моторное масло топлива [22]. При концентрации топлива в работающем моторном масле 10W-40 до 0,8% происходит снижение вязкости ниже границы класса SAE 40 уже при наработке около 10 тыс. км, что вследствие уменьшения масляного клина и смывания масляной пленки с гильз цилиндров приводит к интенсивному изнашиванию деталей двигателя. Концентрация железа в масле превысила аналогичный показатель для исправного двигателя при той же наработке в 4 раза. Нуж-

но отметить, что лёгкие топливные фракции углеводородов имеют высокую скорость окисления, образуя лаковые отложения, кокс, асфальтены и другие загрязняющие вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Увеличение пробега между заменами моторного масла увеличивает количество доливок свежего продукта для компенсации возможного снижения уровня масла в двигателе.

Увеличение доливок оказывает неоднозначное влияние на надежность двигателя. С одной стороны, разбавление моторного масла свежим продуктом улучшает свойства работающего моторного масла, с другой – возрастает вероятность попадания внешних загрязнений и смешения моторных масел различных, «конфликтующих» составов, что может привести к резкому снижению эксплуатационных свойств работающего масла.

В условиях междугородних перевозок, когда автомобили долгое время находятся вдали от сертифицированных СТО с необходимыми смазочными материалами, водители вынуждены, полагаясь на свой опыт, использовать доступные смазочные материалы сторонних производителей, которые могут отличаться по составу от применяемого моторного масла.

Так, в ходе проведения эксплуатационных испытаний были выявлены доливки смазочных материалов стороннего производителя в двух из десяти подконтрольных автомобилей.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Увеличение интервалов замены моторного масла снижает затраты на эксплуатацию техники за счет сокращения количества проводимых технических обслуживаний за жизненный цикл автомобиля. Так, при переходе с межсервисного интервала 60 000 км на интервал 80 000 км количество технических обслуживаний при пробеге 1 000 000 км сокращается на 5 технических обслуживаний (с 17 до 12) на одну единицу техники. Если принять среднюю стоимость технического обслуживания для автомобилей Mercedes-Benz в 20–25 тыс. рублей, получим экономию 100–125 тыс. рублей / ед. техники.

2) При увеличении интервалов замены сокращается количество диагностических воздействий, что увеличивает риски скрытых неисправностей, которые могут привести к поломкам. Так, нарушения в работе системы питания двигателя резко снижают эксплуатационные свойства используемого моторного

масла и приводят к повышенному износу деталей двигателя.

3) Увеличение интервалов замены способствует росту количества доливок свежего моторного масла для компенсации естественного расхода масла на угар и в случае возникновения неисправностей компенсацию утечек, что дополнительно увеличивает риск снижения эксплуатационных свойств смеси моторных масел – применяемого и долитого.

4) Снижение рисков возможно за счет промежуточного контроля состояния моторного масла. Промежуточная оценка состояния моторного масла позволяет не только выявить скрытые неисправности двигателей автомобилей парка, но и прогнозировать ресурс моторного масла до замены и корректировать межсервисные интервалы с учетом фактического состояния смазочного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. X. A. Zhang, Y. Zhao, K. Ma, Q. Wang. Friction behavior and wear protection ability of selected base lubricants // *Friction*. 2016. Vol. 4. no. 1, pp. 72–83.
2. M. Laad, V. Kumar S.Jatti. Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil // *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018. Vol. 30. no. 2, pp. 116–122.
3. B. Tormosa, R. Novella, J. Gomez-Soriano, A. García-Barberá, N. Tsuji, I. Uehara, M. Alonsoc. Study of the influence of emission control strategies on the soot content and fuel dilution in engine oil // *Tribology International*. 2019. Vol.136. pp. 285–298.
4. H. Raposo, J.TorresFarinha, I.Fonseca, D. Galarb. Predicting condition based on oil analysis – A case study // *Tribology International*. 2019. Vol.135. pp. 65–74.
5. E. Rostek, M. Babiak, E. Wróblewski. The Influence of Oil Pressure in the Engine Lubrication System on Friction Losses // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 92. pp. 771–776.
6. Mohammad Hemmat Esfe, Ali Akbar Abbasian Arani, Saeed Esfandeh. Improving engine oil lubrication in light-duty vehicles by using of dispersing MWCNT and ZnO nanoparticles in 5W50 as viscosity index improvers (VII) // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 143. pp. 493–506.
7. Shanhong Wan, Yana Xia, Sang T.Pham, Anh Kiet Tieu, HongtaoZhu, Qinglin Li. Unveiling oil-additive/surface hierarchy at real ring-liner contact // *Surfaces and Interfaces*. 2019. Vol.15, pp. 1–10.

8. L. Srata, S. Farres, F. Fethi. Engine oil authentication using near infrared spectroscopy and chemometrics methods // *Vibrational Spectroscopy*. 2019. Vol. 100. pp. 99–106.

9. M.F. Sgroi, M. Asti, F. Gili, F.A. Deorsola, S. Bensaid, D. Fino, G. Kraft, I. Garcia, F. Dassenoy. Engine bench and road testing of an engine oil containing MoS₂ particles as nano-additive for friction reduction // *Tribology International*. 2017. Vol. 105. pp. 317–325.

10. B. Tormos, B. Pla, S. Bastidas, L. Ramírez, T. Pérez. Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions // *Tribology International*. 2019. Vol. 138. pp. 263–270.

11. G. Yadav, S. Tiwari, M.L. Jain. Tribological analysis of extreme pressure and anti-wear properties of engine lubricating oil using four ball tester // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. pp. 248–253.

12. S.I. Shara, E.A. Eissa, J.S. Basta. Polymers additive for improving the flow properties of lubricating oil // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27. pp. 795–799.

13. Mohamed Kamal Ahmed Ali, Peng Fuming, Hussein A. Younus, Mohamed A.A. Abdelkareem, F.A. Essa, Ahmed Elagouz, Hou Xianjun. Fuel economy in gasoline engines using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricant additives // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. pp. 461–478.

14. J.A. Heredia-Cancino, M. Ramezani, M.E. Álvarez-Ramos. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures // *Tribology International*. 2018. Vol. 124. pp. 230–237.

15. G. Kalghatgi. Development of Fuel / Engine Systems – The Way Forward to Sustainable Transport // *Engineering*. 2019. Vol. 5, pp. 510–518.

16. R. Singh Notay, M. Priest, M.F. Fox. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine // *Tribology International*. 2019. Vol. 129. pp. 112–123.

17. S. Zzeyani, M. Mikou, J. Naja, A. Elachhab. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil // *Tribology International*. 2017. Vol. 114. pp. 27–32.

18. M. Repka, N. Dörr, J. Brenner, Ch. Gabler, C. McAleese, O. Ishigo, M. Koshima. Lubricant-surface interactions of polymer-coated engine journal bearings // *Tribology International*. 2017. Vol. 109. pp. 519–528.

19. Mohamed Kamal Ahmed Ali, Hou Xianjun, Liqiang Mai, Chen Bicheng, Richard Fiifi Turkson, Cai Qingping. Reducing frictional power

losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives // *Wear*. 2016. Vol. 364–365. pp. 270–281.

20. E. Distaso, R. Amirante, G. Calò, P. De Palma, P. Tamburrano, R.D. Reitz. Investigation of Lubricant Oil influence on Ignition of Gasoline-like Fuels by a Detailed Reaction Mechanism // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. pp. 663–670.

21. K. Sepyani, M. Afrand, Mohammad Hemmat Esfe. An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil // *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Volume 236. pp. 198–204.

22. S. Ebnesajjad, R. Morgan. Applications of Fluorinated Additives for Lubricants // In *Plastics Design Library: Fluoropolymer Additives* (Second Edition); William Andrew Publishing. 2019. pp. 75–119.

Поступила 27.06.2018, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мачехин Николай Юрьевич – доц. кафедры «Ремонт бронетанковой и автомобильной техники» Омского автобронетанкового инженерного института; <https://orcid.org/0000-0003-3779-437X>.

Ширлин Иван Иванович – канд. техн. наук, главный специалист отдела испытаний и технических сервисов для автомобильной и специализированной техники ООО «Газпромнефть – смазочные материалы»; <https://orcid.org/0000-0002-1356-5073>.

Пашукевич София Вячеславовна – магистрант группы ХТм – 183, кафедра «Химическая технология», ФГБОУ ВО «ОмГТУ» (644050, г. Омск, пр. Мира, 11), инженер НИО ФГБОУ ВО «СиБАДИ». (E-mail: sofia96@bk.ru). <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay Yu. Machehkhin – Associate Professor of the Repair of Armored and Automotive Vehicles Department, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute.

Ivan I. Shirlin – Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Department of

Testing and Technical Services for Automotive and Specialized Equipment, Gazpromneft – Lubricants.

Sofia V. Pashukevich – Master Student, Chemical Technology Department, Omsk State Technical University, Engineer of the Research Institute in the Siberian State Automobile and Highway University (644050, Omsk, 11, Mira Ave.).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Мачехин Николай Юрьевич – 30%

Ширлин Иван Иванович – 20%

Пашукевич София Вячеславовна – 20%

AUTHORS' CONTRIBUTION

Nikolay Yu. Machekhin – 30%

Ivan I. Shirlin – 20%

Sofia V. Pashukevich – 20%

РАЗДЕЛ III.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 625.7: 625.731

МЕТОД РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОСНОВАНИЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

А.С. Александров, Т.В. Семенова*, Н.П. Александрова
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия,
*stv8@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Остаточные деформации, накапливаемые материалами конструктивных слоев дорожных одежд и грунтов земляного полотна, оказывают существенное влияние на ровность дорожных покрытий.

Материалы и методы. Выполнен анализ моделей расчета остаточных деформаций, накапливаемых зернистыми материалами при воздействии повторных нагрузок. Установлен наследственный характер накопления деформации зернистыми материалами. Это позволило применить интегральное исчисление для аналитического решения задачи о зависимости остаточной деформации от числа повторных нагрузок, величины главных напряжений. Решение получено в виде логарифмических и степенных функций, связывающих накапливаемую деформацию с деформацией, возникающей от первого приложения нагрузки с числом приложений нагрузок. При определении деформации от первого приложения нагрузки авторами приняты во внимание модель теории пластичности, в которой упругопластическая деформация определяется суммой двух составляющих упругой и пластической, а так же реологические модели, рассматривающие деформацию как сумму трех или четырех составляющих. Обобщая модель на различные материалы, предпочтение отдано модели, в которой упругопластическая деформация определяется четырьмя составляющими: мгновенными упругими и остаточными деформациями, эластической (упруго-вязкой) деформацией и вязкопластической составляющей. Поэтому остаточная деформация от первого приложения нагрузки представлена суммой двух составляющих мгновенной необратимой и вязкопластической. Вязкопластическая составляющая деформации является следствием релаксации напряжения за сравнительно короткий промежуток времени равный продолжительности воздействия нагрузки. В дальнейшем это позволит учитывать влияние скорости движения на продолжительность действия нагрузки и величину вязкопластической составляющей остаточной деформации. Авторы подчеркнут, что учет вязкопластической составляющей остаточной деформации наиболее целесообразен при вычислении остаточных деформаций грунтов и материалов обработанных органическим вяжущим. Зернистые материалы менее чувствительны к вязкопластической деформации при однократном приложении нагрузки, но, как показывают данные экспериментов, при превышении напряжением предела упругой, и тем более пластической приспособляемости щебня, гравия и т.п. вязкопластическая деформация вносит существенный вклад в накопленную остаточную деформацию.

Результаты. Выполнен анализ экспериментальных данных по трехосному сжатию различных зернистых материалов и определены параметры, полученных степенных и логарифмических функций. В число исследованных материалов входят: гранитный, гнейсовый, гранодиоритовый и диоритовый щебень, песчано-гравийные и щебеночно-гравийные смеси с минеральной частью из различных горных пород, укрепленные пески.

Заключение. Показана возможность применения, полученных решений, для расчета смещения поверхности слоев дорожной одежды из зернистых материалов. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорога, зернистый материал, остаточная деформация, трехосное сжатие, смещение поверхности слоев дорожной одежды.

© А.С. Александров, Т.В. Семенова, Н.П. Александрова



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATERIALS USED IN THE ROAD BASES: METHOD OF THE RESIDUAL DEFORMATIONS' CALCULATION

A.S. Aleksandrov, T.V. Semenova*, N.P. Aleksandrova
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia
*stv8@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Residual deformations accumulated by materials of structural layers of pavements and subgrade soil have a significant impact on the evenness of road structures.

Materials and methods. The authors performed the analysis of the models for calculating residual deformations accumulated by granular materials and under the influence of repeated loads. The research showed the hereditary nature of the strain granular materials' accumulation. Therefore, the authors used integral calculus for analytical solution of the residual deformation's dependence on the number of repeated loads and on the magnitude of the main stresses. Moreover, the authors obtained the solution in the form of logarithmic and power functions, which associated the accumulated deformation with the deformation arising from the first load application. In determining the deformation from the first load application, the authors took into account the model of the theory of plasticity, in which the elastoplastic deformation was determined by the sum of two components elastic and plastic, as well as rheological models considering the deformation as the sum of three or four components. Generalizing the model for various materials, the authors gave the preference to the model, in which the elastoplastic deformation was determined by four components: instantaneous elastic and residual deformations, elastic (elastic-viscous) deformation and a viscoplastic component. Therefore, the residual strain from the first load application was represented by the sum of the two components, instantaneous irreversible and viscoplastic. The viscoplastic component of the deformation was a result of stress relaxation in a relatively short period of time equal to the duration of the load impact. Such research allowed taking into account the effect of speed on the duration of the load and the magnitude of the viscoplastic component of the residual deformation. The authors emphasized that taking into account the viscous-plastic component of residual deformation was most appropriate when calculating residual deformations of soils and materials treated with an organic binder. Granular materials were less sensitive to viscoplastic deformation under a single load application, but, when the voltage exceeded the elastic limit, and the more plastic adaptability of crushed stone, gravel, etc. viscoplastic deformation made a significant contribution to the accumulated residual deformation.

Results. As a result, the authors carried out the analysis of experimental data on the triaxial compression of various granular materials and determined the parameters obtained for the power and logarithmic functions. The authors studied such materials as granite, gneissic, granodiorite and diorite crushed stone, sand, gravel and crushed stone, gravel mixtures with a mineral part from various rocks and fortified sands.

Discussion and conclusions. The paper demonstrates the possibility of using the solutions for calculation of the surface displacement of the pavement layers of granular materials. The authors formulate the tasks for further research.

KEYWORDS: road, granular material, residual deformation, three-axis compression, displacement of the pavement layers.

© A.S. Aleksandrov, T.V. Semenova, N.P. Aleksandrova



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

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные деформации, накапливаемые материалами конструктивных слоев дорожных одежд и грунтов земляного полотна, оказывают существенное влияние на ровность покрытий дорожных одежд. Влияние остаточных деформаций на ровность покрытий автомобильных дорог можно продемонстрировать на моделях формирования и развития колеи. Известно два типа таких моделей. Первый тип раскрывает физическую суть формирования колеи на асфальтобетонных покрытиях [1–3]. Типы таких колеи приведены на рис. 1.

Анализируя причины образования структурной колеи специалисты [1–3] говорят, что такая колея, как правило, затрагивает все слои дорожной одежды, но наиболее часто является следствием накопления деформаций деформации в пределах зернистых слоев основания и земляного полотна. Кроме того, такая колея может быть вызвана сочетанием слабых грунтов, плохого дренажа и воздей-

ствием тяжелой нагрузки. В качестве причин возникновения указывают недостатки проектирования и качества строительства.

Колея, образующаяся вследствие нестабильной структуры асфальтобетона, возникает в результате пластических сдвиговых деформаций, протекающих в слоях из асфальтобетона. Причина формирования такой колеи связана с механическими свойствами асфальтобетонной смеси, содержанием воздушных пустот и стойкостью смеси к сдвигу [1].

Колея, обусловленная поверхностным износом покрытия, образуется только в верхнем асфальтобетонном слое. Это связано с прогрессирующей потерей агрегатных частиц с поверхности дорожного покрытия, что вызвано комбинированным воздействием окружающей среды и шин, прежде всего, шипованных шин [1, 2]. Специалисты из скандинавских стран отмечают влияние на износ покрытия антигололедных смесей, которые при обработке покрытия являются абразивом, способствующим увеличению интенсивности износа.

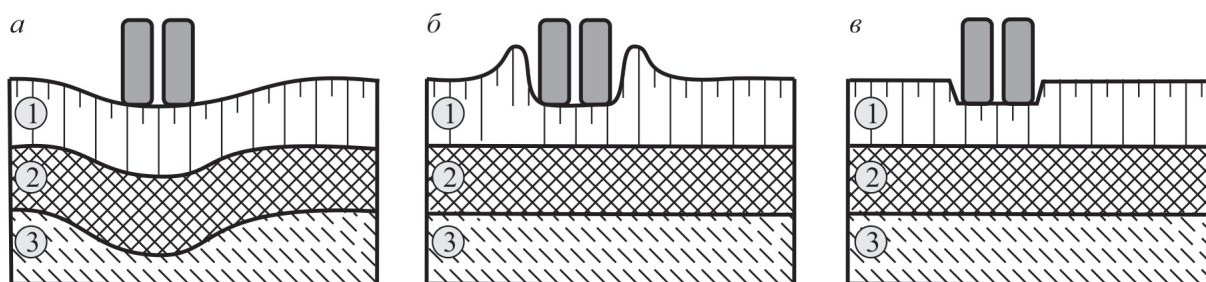


Рисунок 1 – Типы колеи на асфальтобетонных покрытиях [1, 2]: а – структурная колеиность; б – нестабильная структура асфальтобетона; в – поверхностный износ покрытия; 1 – слои дорожной одежды из асфальтобетона; 2 – несущие и дополнительные слои основания; 3 – земляное полотно

Figure 1 – Types of ruts on asphalt concrete pavements [1, 2]: a – structural rutting; b – instability structure; c – surface wear rutting; 1 – layers of pavement made of asphalt concrete; 2 – bearing and additional base layers; 3 – subgrade

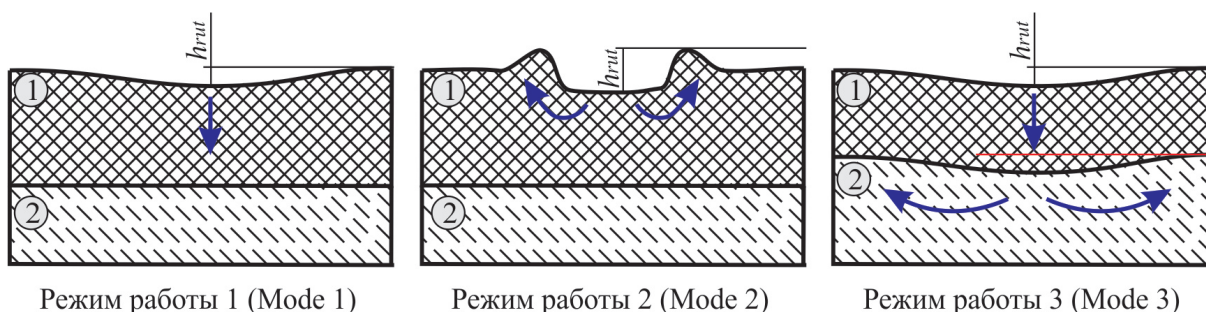


Рисунок 2 – Типы колеи на покрытиях из зернистых материалов [3–6]: 1 – слои дорожной одежды из зернистых материалов; 3 – земляное полотно
Figure 2 – Ruts' types on coatings from granular materials [3–6]: 1 – layers of pavement made of granular materials; 3 – subgrade

Колеи второго типа формируются на покрытиях из зернистых материалов, они классифицированы, а причины их появления и развития хорошо изучены [3–6]. Колеи такого типа приведены на рис. 2.

Типы колеи, формирующиеся на покрытиях из зернистых материалов, подразделяют по режиму работы дорожной одежды и грунта земляного полотна. Такие режимы работы хорошо согласуются со стадиями работы грунтового основания, классифицированными в СССР Н.М. Герсевановым. Колея при режиме работы 1 обусловлена преимущественно деформациями уплотнения, возникающими в слоях из зернистых материалов. Проводя параллель со стадиями деформирования грунтового основания по Н.М. Гесеванову, отметим, что такое деформирование имеет место тогда когда давление, воспринимаемое основанием, не превышает первой критической нагрузки. В этом случае осадки основания связаны с давлением линейной зависимостью, или слабовыраженной нелинейной зависимостью, которую можно приближать линейной функцией. Подчеркнем, что описывая эту стадию деформирования, мы говорим о грунтовом массиве и о связи его осадок с воспринимаемым им давлением. Но в наиболее опасной точке этого массива грунта может иметь место предельное состояние по критерию Мора–Кулона и в такой точке связь деформаций с компонентами тензора напряжений нелинейная.

Колея, обусловленная режимом работы 2, возникает в результате деформаций сдвига в слоях из зернистых материалов, а при режиме работы 3 колея образуется из-за деформаций сдвига в грунте земляного полотна. Такие колеи могут соответствовать стадиям деформирования основания по Н.М. Гесеванову, характеризуемым как стадией сдвигов, так и стадией потери несущей способности. Для стадии потери несущей способности характерно образование выпоров материала за зоной приложения нагрузки. Такая картина имеет место тогда, когда давление превышает вторую критическую нагрузку. Стадия сдвигов является переходной от стадии уплотнения к стадии потери несущей способности. При таком деформировании давление превышает первую критическую нагрузку, но не превышает вторую критическую нагрузку. Связь осадок с давлениями нелинейная.

Безусловно, что для всех типов колеи, включая колеиность, обусловленную износом покрытия, необходимо изучать деформирование дорожно-строительных материалов и

грунтов при воздействии многократно прикладываемых нагрузок. Причем большое значение имеет как число приложений нагрузки, так и величина напряжений, и продолжительность воздействия нагрузки.

В настоящее время в этом направлении выполнено большое количество работ, результаты которых легли в основу эмпирических формул, предназначенных для прогнозирования как глубины колеи, так и различных показателей ровности: амплитуды неровности (глубины продольной неровности), просветов под рейкой, укладываемой на покрытие, показателей ровности по различным динамическим приборам. Кроме того, известны эмпирические зависимости для определения предельного числа расчетных транспортных нагрузок, превышение которого приводит к накоплению недопустимой остаточной деформации или разрушению асфальтобетонных слоев от растяжения при изгибе. Также известны формулы для вычисления толщины дорожной одежды эквивалентной толщине слоя из щебня на земляном полотне, свойства грунта которого характеризуется определенной величиной калифорнийского числа несущей способности. Такие эмпирические зависимости известны под общим названием механико-эмпирические методы расчета дорожных одежд. Анализ формул механико-эмпирических методов расчета дорожных одежд выполнен в работах [7–12].

Анализируя работы, преследующие цель разработки методов расчета глубины неровности, выделим два подхода. Согласно первому подходу глубина неровности определяется разностью необратимых смещений поверхности покрытия в рассматриваемой точке сечения и в точке сечения с наименьшей накопленной остаточной деформацией. То есть, глубина неровности определяется относительно точки с наименьшим смещением поверхности покрытия. В таких решениях смещение поверхности покрытия определяется суммой необратимых перемещений поверхностей каждого слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна. Необратимое перемещение поверхности слоя определяется интегрированием функции остаточной деформации по глубине. Пределами интегрирования является условный ноль, которым обозначена поверхность слоя, и толщина слоя, ограниченная ординатой z , а в полупространстве бесконечностью. Этот подход полностью соответствует принципам механики грунтов, согласно которым при решении осесимметричной задачи осадку полупростран-

ства или слоя конечной толщины находят интегрированием функции вертикальной деформации по глубине [13–15]. Демонстрируя такой способ решения, специалисты обычно приводят задачу Ж. Буссинеска, в которой интегральное уравнение для вычисления осадки имеет вид [14, 15]:

$$U_z = \int_0^z \varepsilon_z dz = \frac{1}{E} \cdot \int_0^z [\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] dz = \frac{1}{E} \cdot \int_0^z [\sigma_z - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_x] dz, \quad (1)$$

Где ε_z – вертикальная деформация, определяемая соответствующим выражением обобщенного закона Р. Гука; E и μ – продольный модуль упругости (при малых упругопластических деформациях это продольный модуль деформации) и коэффициент Пуассона, E измеряется в Па, а μ безразмерная величина; σ_z , σ_x и σ_y – нормальные компоненты тензора напряжений, которые в точках оси симметрии нагрузки являются главными напряжениями $\sigma_z = \sigma_1$, $\sigma_y = \sigma_2$ и $\sigma_x = \sigma_3$, причем $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_3$, Па.

Способ определения перемещения поверхности полупространства использовал Н.Н. Иванов при выводе формулы для расчета общего модуля упругости двухслойной системы. Решение Н.Н. Иванова называют методом Союздорнии, который использовался в первой инструкции по расчету дорожных одежд нежесткого типа ВСН 46-60.

В последнее время способ расчета смещения поверхности однородного или слоистого полупространства, записанный в виде интегрального выражения (1), применен специалистами дорожной отрасли для расчета осадки, обусловленной воздействием кратковременной динамической нагрузки. Такое решение дано Hirakawa D. и соавторами [16]. В этой работе осадка полупространства в общем виде определяется по формуле [16, с. 315]:

$$U_z = \int_{z=0}^{\infty} \varepsilon_z(t, z) dz, \quad (2)$$

где t – продолжительность действия нагрузки, с.

Авторы решения (2) провели испытания основания динамической нагрузкой и, анализируя экспериментальные данные, пришли к выводу, что различных глубинах пиковые деформации имеют сдвигу по времени, учет которой можно выполнить корректировкой подынтегральной функции в уравнении (2). После такой корректировки формула (2) примет вид:

$$U_z = \int_{z=0}^{\infty} \varepsilon_z \left(t - \frac{z}{J_p}, z \right) dz, \quad (3)$$

где J_p – скорость распространения волны в материале основания, например, грунте земляного полотна, м/с.

Работа [16] вышла в свет на японском языке, что может составлять затруднения при переводе, но материалы этой работы описываются другими специалистами в англоязычных публикациях [17, 18].

Принцип определения осадки полупространства интегрированием зависимости изменения вертикальной деформации по глубине можно использовать при расчете необратимой деформации, накапливаемой материалом полупространства при воздействии повторной нагрузки. В этом случае имеем:

$$U_z = \int_{z=0}^{\infty} \varepsilon_z(N, z) dz, \quad (4)$$

где N – число приложенных нагрузок.

Второй подход состоит в том, что глубина колеи определяется по деформации одного из слоев дорожной одежды или грунта земляного полотна [12, 19, 20]. Причем указания [12] позволяют вычислить ошибки прогнозирования глубины колеи по каждому из конструктивных элементов: асфальтобетонным слоям, слоям из зернистых материалов, земляному полотну.

В решениях, отнесенных нами к первому подходу, большое значение для точности расчета приобретает подынтегральная функция остаточной деформации по глубине. Эта функция должна учитывать ряд факторов, раскрытие которых является целью настоящей работы. Для решений второго подхода важны экспериментальные данные об остаточных деформациях материалов и грунтов [21, 22]. Такие экспериментальные данные можно представить эмпирическими формулами, определяющими остаточную деформацию от числа нагрузок, величины главных напряжений, параметров материалов и других факторов. Поэтому независимо от выбранного подхода инженер сталкивается с необходимостью численного моделирования остаточных деформаций материалов, грунтов и асфальтобетон. Учитывая существенные различия в механике асфальтобетона и зернистой среды, авторы сконцентрируют усилия на разработке модели необратимого деформирования грунта, зернистого материала и песков, укрепленных органическим вяжущим.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализируя модели накопления деформаций зернистыми материалами специалисты [23, 24] приходят к выводу, что такие решения можно разделить на аналитические и эмпирические. Эмпирические модели накопления деформации являются сложной функцией многих факторов. Одним из факторов является количество нагрузок, которое учитывается введением отдельного множителя в виде функции числа нагрузок N . Функции числа нагрузок могут быть логарифмическими, степенными, экспоненциальными и комбинированными, включающими две и более функции [25–29]. В общем виде функциональную зависимость, накапливаемой остаточной деформации ε_n от числа нагрузок N . Можно представить формулой:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n \cdot f(N, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, a, b, c, d), \quad (5)$$

где ε_n – остаточная деформация материала, накапливаемая за n приложений нагрузки, причем $n \ll N$ и обычно варьируется в диапазоне $n=1 \dots 10^3$; a, b, c, d – параметры модели, зависящие от величины главных напряжений, времени воздействия нагрузки, продолжительности периода отдыха между приложениями нагрузки, значений характеристик физических свойств материала.

В настоящее время известно много фор-

мул, предназначенных для расчета остаточных деформаций, накапливаемых различными материалами [25–36, 38, 39]. Эти зависимости получены эмпирическим путем и соответствуют принципам, показанным в обобщенном выражении (5). По нашему мнению недостатком такого подхода является невозможность учета на величину накапливаемой деформации продолжительности действия кратковременной нагрузки. Различия в продолжительности действия нагрузки на элементы дорожной конструкции можно объяснить различными скоростями движения. Чем быстрее перемещается нагрузка, тем меньше продолжительность ее воздействия. С уменьшением времени действия нагрузки уменьшается величина отрелаксировавшего напряжения, вследствие чего значение вязкой составляющей остаточной деформации тоже уменьшается. Вместе с тем увеличение скорости нагрузки приводит к возрастанию динамического коэффициента, в результате чего возрастает деформация дорожной одежды. Из этого следует, что влияние скорости движения на НДС дорожной одежды и земляное полотно неоднозначно. Поэтому учет скорости движения в расчетах остаточной деформации важен. Значит в формуле (5) остаточную деформацию материала ε_n целесообразно представить суммой двух составляющих мгновенной ε_{insn} и вязкой ε_{viscn} . Такой подход соответствует общему принципу реологии грунтов и материалов, в котором упругопластическая деформация определяется четырьмя составляющими мгновенными упругой и остаточной деформациями, а также упруговязкой и вязкопластической деформации. В этом случае обратимая деформация находится суммой мгновенной упругой и упруговязкой составляющих деформации, а остаточная – мгновенной остаточной и вязкопластической составляющих деформации. Мгновенные составляющие упруго-пластической деформации не зависят от продолжительности действия нагрузки. Это значит, что мгновенная остаточная деформация является функцией напряжений, параметров материала и числа расчетных нагрузок. Вязкие деформации зависят от времени действия нагрузки, чем продолжительнее действие нагрузки, тем больше вязкая составляющая упругопластической деформации. Кроме того, чем дольше время воздействия нагрузки, тем большая величина напряжения релаксирует, и тем больше величина вязкопластической деформации. Такое утверждение вытекает из анализа деформирования реологических тел Максвелла,

Шведова и др. в этом случае интегральное уравнение (4) примет вид:

$$U_z = \int_{z=0}^{\infty} [\varepsilon_{insn}(N, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, a, b, c, d) + \varepsilon_{viscn}(N, t, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, a, b, c, d)] dz. \quad (6)$$

Отметим, что учет вязкопластической составляющей остаточной деформации наиболее целесообразен при вычислении остаточных деформаций грунтов и материалов обработанных органическим вяжущим. Зернистые материалы менее чувствительны к вязкопластической деформации при однократном приложении нагрузки, но, как показывают данные экспериментов, при превышении напряжением предела упругой, и тем более пластической приспособляемости щебня, гравия и т.п. вязкопластическая деформация вносит существенный вклад в накопленную остаточную деформацию. Тем не менее, именно выделение двух составляющих остаточной деформации позволяют сформулировать общий подход к решению этой задачи.

В публикации [37] нами предложено для прогнозирования остаточных деформаций материалов и грунтов применять уравнения наследственных теорий. Суть этого предложения состоит в интегрировании функции приращения деформации $D\varepsilon_n$ по числу нагрузок dn , которое варьируется в пределах от 1 до N . Приращение остаточной деформации $D\varepsilon_n$ состоит из двух составляющих мгновенной $D\varepsilon_{insn}$ и вязкой $D\varepsilon_{viscn}$. В таблице 1 приведены функции приращения составляющих деформаций и интегральные уравнения.

Таблица 1
Функции приращения остаточной деформации и интегральные уравнения

Table 1
Functions of increasing residual deformation and integral equations

Функция приращения составляющих деформации		Интегральное уравнение для расчета остаточной деформации
мгновенная остаточная деформация	$\Delta\varepsilon_{insn} = a \cdot n^{-1}$	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{insn} + \varepsilon_{viscn}) \cdot \left[1 + a \cdot \int_1^N n^{-1} dn \right]$
вязкая остаточная деформация	$\Delta\varepsilon_{viscn} = a \cdot n^{-1}$	
мгновенная остаточная деформация	$\Delta\varepsilon_{insn} = b \cdot n^c$	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{insn} + \varepsilon_{viscn}) \cdot \left[1 + b \cdot \int_1^N n^c dn \right]$
вязкая остаточная деформация	$\Delta\varepsilon_{viscn} = b \cdot n^c$	

Отметим, что функции приращений мгновенных и вязких составляющих остаточной деформации записаны одинаково. Здесь использованы правила алгебры матриц. Согласно первому правилу матрица раскладывается на сумму составляющих. В данном случае интересующая нас компонента тензора остаточных деформаций ε_n разложена на две составляющие и представлена суммой компонент тензора мгновенных остаточных деформаций ε_{insn} и тензора вязкопластических деформаций ε_{viscn} . Согласно второму правилу произведение матрицы на число или функцию определяется произведением каждой компоненты на это число или функцию. Это правило реализовано в интегральных уравнениях. Так же отметим, что величина вязкопластической деформации ε_{viscn} зависит от времени действия нагрузки, хотя в табл. 1 функция времени не приведена.

Взяв интегралы, представленные в таблице 1, получено 4 модели накопления остаточной деформации в материале и грунте. Эти решения приведены в таблице 2. В первой логарифмической однопараметрической модели и второй степенной двухпараметрической модели принято, что $n=1$, $D\varepsilon_{insn} = \varepsilon_{ins1}$, а $D\varepsilon_{viscn} = \varepsilon_{vic1}$. Причем мгновенная составляющая от первого приложения нагрузки ε_{ins1} является функцией главных напряжений и параметров материала, а вязкопластическая составляющая остаточной деформации от первого приложения нагрузки ε_{vic1} еще является и функцией времени. Таким образом, в этих моделях предполагается, что накапливаемая деформация связана с суммой составляющих остаточной деформации, испытываемой материалом от первого приложения нагрузки $n=1$.

Таблица 2
Аналитические формулы для расчета остаточной деформации

Table 2

Analytical forms for calculation of residual deformation

Наименование модели	Формула
1. Логарифмическая однопараметрическая	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}) \cdot [1 + a \cdot \ln N]$
2. Степенная двухпараметрическая	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}) \cdot \left[1 + b \cdot \frac{N^{c+1} - 1}{c + 1} \right]$
3. Логарифмическая двухпараметрическая	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}) \cdot [1 + d \cdot (\ln n)] \cdot \left[1 + a \cdot \left(\ln \frac{N}{n} \right) \right]$
4. Степенная трехпараметрическая	$\varepsilon_N = (\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}) \cdot [1 + d \cdot (\ln n)] \cdot \left[1 + b \cdot \frac{N^{c+1} - n^{c+1}}{c + 1} \right]$
где n – число нагрузок, при приложении которых, накопленная остаточная деформация ε_N , коррелирует с деформацией от однократного приложения нагрузки по логарифмической зависимости $\varepsilon_{insn} + \varepsilon_{viscn} = (\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}) \cdot [1 + d \cdot (\ln n)]$ (число нагрузок n принимается в пределах $n=100 \dots 200$);	

Третья и четвертая формулы в таблице 2 получены тем, что после интегрирования второй зависимости таблицы 1, в ней положена связь составляющих остаточной деформации ε_{insn} и ε_{viscn} с соответствующими составляющими, возникающими от первого приложения нагрузки ε_{ins1} и ε_{visc1} . Такая связь описана логарифмической зависимостью представленной в примечании к таблице 2. В этих формулах вязкопластическая составляющая от первого приложения нагрузки так же является функцией времени, главных напряжений и параметров материала. Благодаря такому приему во всех формулах таблицы 2, накапливаемая остаточная деформация ε_N связана с суммой составляющих деформации от первого приложения нагрузки ($\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}$).

Поясняя преимущества аналитических моделей табл. 2 отметим, что представление деформации от первого приложения нагрузки двумя составляющими мгновенной и вязкой позволяет учитывать влияние продолжительности действия нагрузки на величину вязкопластической деформации от первого приложения нагрузки и величину накопленной вязкопластической деформации. В этом случае мгновенная составляющая не зависит от времени воздействия нагрузки, она определяется величиной главных напряжений и параметров материала. Вязкая составляющая связана как с величиной главных напряжений и параметрами материала, так и с продолжительностью действия нагрузки. Для вычисле-

ния вязкой составляющей остаточной деформации необходимо найти функцию времени, позволяющую рассчитывать эту деформацию с приемлемой точностью. Обратим внимание, что продолжительность воздействия транспортных нагрузок зависит от скорости движения. Поэтому решения таблицы 2 позволяют учитывать различие в скорости движения транспортных средств.

Зависимости таблицы 2 можно использовать в решении задачи об осадке слоя дорожной одежды из зернистого материала. Для вычисления осадки слоя по оси симметрии нагрузки достаточно проинтегрировать одно из выражений таблицы 2 по глубине этого слоя в пределах от $Z=0$ (поверхность слоя) до $Z=-h$ (нижняя граница слоя). Смещение поверхности покрытия дорожной одежды можно определить суммой осадок всех слоев, включая грунт земляного полотна.

Однако для реализации этого подхода необходимо определить параметры моделей таблицы 2 (a , b , c and d) и раскрыть их зависимость от величины главных напряжений и показателей физических свойств материала. Для этого нужно анализировать данные испытаний материалов по трехосному сжатию однократной и повторной нагрузкой. Такие испытания выполняют при помощи измерительно-вычислительных комплексов [30–36].

При выполнении трехосных испытаний с помощью измерительно-вычислительных комплексов, образцы цилиндрической формы помещают в прибор трехосного сжатия и ис-

пытывают приложением повторных нагрузок с одинаковыми главными напряжениями. Число приложений повторных нагрузок составлять 10^6 и более. Методики изготовления образцов и их испытаний подробно описаны в исследовательских работах [32–36, 38, 39]. Образцы из зернистых материалов требуемой влажности уплотняют при помощи виброуплотнителей или трамбования. Для этого материал помещают в сборно-разъемную цилиндрическую форму, в которой закреплена специальная резиновая (латексная) оболочка. После уплотнения цилиндрический образец в оболочке размещается в камере трехосного сжатия динамического прибора. Далее задается программа испытаний, в соответствии с которой производится приложение циклических нагрузок с измерением упругопластических и обратимых деформаций. Остаточные деформации вычисляются по разности соответствующих числу приложения нагрузки упругопластической и обратимой деформаций. В работах [30–39] приведены показатели физико-механических свойств и гранулометрического со-

става всех испытанных материалов. Анализ этих параметров показывает, что материалы соответствуют требованиям стандартов РФ. Это позволяет использовать данные таких испытаний для определения параметров моделей, представленных в таблице 2, и их дальнейшего применения в расчетах деформаций дорожных конструкций России. Для этого нами разработана методика обработки данных эксперимента. В первую очередь необходимо выполнить подбор эмпирической формулы, которая является аналогом одной из зависимостей таблицы 2. Так как в формулы таблицы 2 представляет собой логарифмические и степенные модели, то для подбора эмпирических формул достаточно воспользоваться линеаризацией с вычислением постоянных коэффициентов методом наименьших квадратов. Этот метод является стандартным, а для вычисления параметров математической модели используют формулы таблицы 3.

Таблица 3

Формулы для расчета коэффициентов функций

Table 3

Formulas for the function factors' calculation

Модель	Формула для вычисления параметров модели
Логарифмическая $y = A \cdot \ln x + B$	$A = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m y_i \cdot \ln x_i - \sum_{i=1}^m \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^m y_i}{m \cdot \sum_{i=1}^m (\ln x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^m \ln x_i\right)^2}; B = \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^m y_i - A \cdot \sum_{i=1}^m \ln x_i\right)$
Степенная $y = C \cdot x^D$	$D = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m \ln x_i \cdot \ln y_i - \sum_{i=1}^m \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^m \ln y_i}{m \cdot \sum_{i=1}^m (\ln x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^m \ln x_i\right)^2}; C = \exp\left(\frac{1}{m} \cdot \left(\sum_{i=1}^m \ln y_i - D \cdot \sum_{i=1}^m \ln x_i\right)\right)$
Примечание: Величина m представляет собой число узлов, по которым выполняется подбор эмпирической формулы, то есть m количество пар значений y_i и x_i , измеренных при эксперименте.	

При подборе эмпирических формул, соответствующих модели №1 (таблицы 2) в качестве зависимой y и независимой x переменной нужно принять:

$$y_i = \frac{\varepsilon_{Ni}}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}}; \quad x_i = N_i. \quad (7)$$

Сопоставляя модель №1 таблицы 2 с логарифмической зависимостью таблицы 3 несложно убедиться, что:

$$a = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_{Ni}}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}} \cdot \ln N_i - \sum_{i=1}^m \ln N_i \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_{Ni}}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}}}{m \cdot \sum_{i=1}^m (\ln N_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^m \ln N_i\right)^2}; \quad b = 1. \quad (8)$$

Формулы (8) позволяют рассчитать параметры однопараметрической логарифмической модели. Сравнивая уравнение двухпараметрической степенной модели (модель №2 таблицы 2) со степенной функцией, представленной в таблице 3., несложно заметить, что эти зависимости отличаются. Тем не менее, модель № 2 таблицы 2 можно привести к виду:

$$\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}} - 1 = \frac{b}{c+1} \cdot (N^{c+1} - 1). \quad (9)$$

Из анализа (9) следует, что зависимая и независимая переменные степенной модели таблицы 2 определяются по формулам:

$$y = \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}} - 1; \quad x = N. \quad (10)$$

Рассматривая второй множитель модели (9), заключенный в скобки, укажем, что:

$$N^{c+1} \gg 1. \quad (11)$$

Вследствие чего можно положить:

$$C \cdot x^D = \frac{b}{c+1} \cdot N^{c+1}. \quad (12)$$

Из зависимости (12) следует, что:

$$c = D - 1; \quad b = C \cdot (c+1) = C \cdot D. \quad (13)$$

При определении параметров моделей №3 и №4 таблицы 2 вначале находят параметр d . Для этого анализируют данные о накоплении пластической деформации от числа нагрузок изменяющихся в диапазоне от 1 до n . Предельное число нагрузок n обычно составляет $n=100...200$. Независимыми переменными являются:

$$y = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{ins1} + \varepsilon_{visc1}}; \quad x = n. \quad (14)$$

Расчет параметров модели аналогичен вычислениям по формулам (8). На втором этапе

определяют значения коэффициента a логарифмической двухпараметрической модели № 3 таблицы 2 или параметров b и c степенной трехпараметрической модели. Теснота связи определяется методами математической статистики, путем вычисления коэффициентов корреляции, детерминации и т.п. В результате подбирается модель, которая наилучшим образом описывает экспериментальные данные.

Таким образом, используя методы подбора эмпирических формул, описывающих данные эксперимента, определяются параметры аналитических решений, представленных в таблице 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время известно большое количество работ, целью которых являлось экспериментальное исследование накопления остаточных деформаций в зернистых материалах при воздействии повторной нагрузки, создающей в материале трехосное сжатие. В работе [39] нами проанализированы данные испытаний R.D. Barksdale [33] и S.Werkmeister [34]. В результате установлено, что величина накапливаемой деформации зависит не только от числа приложения нагрузок, но и от величины девиатора напряжений $s_d = \sigma_1 - \sigma_3$ и значения удерживающего напряжения σ_3 . Для более наглядной иллюстрации влияния уровня напряженного состояния в работе [36] предложен коэффициент k_σ , определяемый отношением девиатора к удерживающему напряжению, то есть:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_3} = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_3. \quad (15)$$

Поэтому определение параметров моделей, представленных в таблице 2 выполнено в зависимости от уровня напряженного состояния, характеризуемого коэффициентом k_σ , определяемым по зависимости (15). Анализ данных испытаний перка, укрепленного битумом [38], позволил определить параметры степенной трехпараметрической модели. Параметры модели приведены в таблице 4.

Таблица 4
Параметры трехпараметрической степенной модели,
накапливания остаточной деформации песком, обработанным битумом
(содержание битума 8,5 %)

Table 4
Parameters of the three parametric power grade model,
the accumulation of residual deformation by sand
(8,5% bitumen content)

Параметры нагрузки		Параметры модели при удерживающем напряжении								
		$\sigma_3 \leq 41,4$ кПа			$\sigma_3 = 138$ кПа			$\sigma_3 \geq 276$ кПа		
k_σ	n	d	b	c	d	b	c	d	B	c
$\leq 0,15$	100	–	–	–	–	–	–	–	0,08	-0,79
0,33	100	–	–	–	–	0,08	-0,79	–	–	–
0,5	100	–	–	–	–	–	–	–	0,074	-0,86
1	100	–	0,06	-0,90	–	0,059	-0,91	–	0,06	-0,91
2	100	–	–	–	–	0,04	-0,95	–	–	–
$\geq 3,33$	100	–	0,04	-0,95	–	–	–	–	–	–

В таблице 5 приведены параметры степенной трехпараметрической модели накапливания деформации щебеночно-песчаной смесью. Эти параметры установлены на основе анализа экспериментальных данных работы [34].

Таблица 5
Параметры трехпараметрической степени модели,
накапливания остаточной деформации щебеночно-песчаной смесью

Table 5
Parameters of the three parametric power grade model,
the accumulation of residual deformation of the bracket-sandy mixture

Параметры нагрузки		Параметры модели при удерживающем напряжении								
		$\sigma_3 \leq 40$ кПа			$\sigma_3 = 70$ кПа			$\sigma_3 \geq 210$ кПа		
k_σ	n	d	b	C	d	b	c	d	b	c
$\leq 0,5$	100	1,734	–	–	0,895	–	–	0,378	0,073	-0,84
1	100	1,566	0,072	-0,83	0,883	0,085	-0,82	0,611	0,071	-0,87
1,5	100	1,397	–	–	0,871	0,071	-0,81	0,770	0,074	-0,74
2	100	1,229	0,065	-0,87	0,920	0,060	-0,92	0,644	0,056	-0,73
3	100	0,682	0,079	-0,70	0,887	0,071	-0,86	0,611	–	–
4	100	2,457	0,072	-0,66	2,295	0,079	-0,81	2,019	–	–
≥ 5	100	2,213	–	–	2,050	0,046	-0,51	1,774	–	–

Подобные параметры нами получены для большого спектра материалов, они приведены в работах [37]. Применяя эти параметры и модели (таблицы 2) можно вычислять деформации, накапливаемые практически любым зернистым материалом, применяемым в дорожном строительстве. Кроме того, установлены параметры моделей, позволяющих рассчитывать деформации накапливаемые материалами, укрепленными вяжущим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа, полученных нами результатов, можно сделать выводы:

1. Применением интегральных уравнений наследственных теорий получены новые решения задачи о накапливании остаточной деформации. Особенностью этих решений является представление деформации от первого приложения нагрузки суммой двух составляющих. Первая составляющая представляет со-

бой мгновенную остаточную деформацию, она не зависит от продолжительности действия нагрузки. Вторая составляющая является вязкой, она определяется функцией времени, в которой продолжительность действия нагрузки учитывается скоростью движения. Обе составляющие деформации являются функциями числа приложенных нагрузок, величины напряжений и параметров материала

2. Анализ результатов трехосных испытаний различных материалов повторной трехосной нагрузкой, выполненных нашими коллегами, позволил нам определить параметры созданных моделей. Причем эти параметры зависят от величины напряжений, которая учитывается коэффициентом уровня напряженного состояния. Этот коэффициент определяется отношением девиатора напряжений к минимальному главному напряжению, которое в условиях трехосного сжатия является удерживающим напряжением, стесняющим вертикальную деформацию.

3. Задачей дальнейших исследований является обоснование функции времени, применяемой при расчете вязкой составляющей деформации от первого приложения нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nguyen T.D., Le L.X. (2016). Research of asphalt pavement rutting on national roads in Vietnam. Electronic resource: access mode [https://www.researchgate.net/publication/307373551]. Data 30.07.2019.
2. NRC CNRC. *Rut Mitigation Techniques at Intersections*. Road and Sidewalks, Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, Canada. 48 p. (2003).
3. Larry Santucci. Rut resistant asphalt pavements. Electronic resource: access mode [https://ru.scribd.com/document/36152416]. Data 30.07.2019.
4. Dawson A., et al. Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. Transportation Research Board Low Volume Roads Conference 2007.
5. Dawson A., Kolisoja, P., Vuorimies, N. Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. 2008. 46 p.
6. Brito L.A.T. Design methods for low volume roads. PhD Thesis. The University of Nottingham. Department of civil engineering. 2011. 223 p.
7. Rodezno M.C., Kaloush K. Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. Road Materials and Pavement Design 12(2), 423–439 (2011).

8. Martinez Díaz M., Pérez I. Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements. Revista de la Construcción 14(1), 32–40 (2015).

9. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин В.Н. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. №5 (57). С. 45-57.

10. Li Q., Xiao D.X., Wang K.C.P. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. Journal of Modern Transportation 19(2), 114–133 (2011).

11. Guo X., Timm D.H. Automating Mechanistic-Empirical Pavement Design Calibration Studies. The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, 309–319 (2016).

12. AASHTO. (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 216 p.

13. Bowles J.E. Foundation analysis and design 5th edition. Singapore: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1207 p. (1997).

14. Kezdi A., Rethati L. *Soil Mechanics of Earthworks, Foundations and Highway Engineering*, Handbook of Soil Mechanics, Elsevier, Volume 3. 361 p. (1988).

15. Pantelidis L. Determination of soil strength characteristics performing the plate bearing test. In processing 3rd International Conference „Modern Technologies in Highway Engineering” Poznań, 8–9 September, 497-506, 2005.

16. Hirakawa D. et al. Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests, Japanese Geotechnical Journal, Vol. 3, No.4, 307-320 (2008) (in Japanese).

17. Bamrungwong C. et al. Development Of A Falling weight deflectometer (FWD) for evaluating the pavement conditions. *ATRANS Research Report 2008*. Bangkok, Thailand, 147 p. (2009).

18. Kongkitkul W. et al. Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer ATRANS Research Volume 2, Issue 1, 14 p. (2010).

19. Su. K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements. First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. Beijing, 486-491 (2008).

20. Moghaddam T.B., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays* 6(4), 670–682 (2011).

21. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: Experimental and numerical investigations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018.

22. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Permanent deformation prediction model of unbound granular materials for flexible pavement design. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1–17 (2018).

23. Ling X. et al. Permanent Deformation Characteristics of Coarse Grained Subgrade Soils under Train-Induced Repeated Load. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2017, Article ID 241479, 15 p.

24. Hornych P., A. El Abd, Selection and evaluation of models for prediction of permanent deformations of unbound granular materials in road pavements. *Work Package*, 5 (2004).

25. Margan N.A. et al. Deformational properties of unbound granular pavement materials. *Processing 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure–Cetra*. 649–656 (2014).

26. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. *Acta Geophysica*, 62(5), 1127–1145 (2014).

27. Rahman M.S., Erlingsson S. Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587–601 (2015).

28. Salour F., Erlingsson S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. *Procedia Engineering* (143), 300–307 (2016).

29. Salour F., Erlingsson S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236–246 (2017).

30. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *MATEC Web of Conferences* (195), Article Number 03010, 1–7 (2018).

31. Jitsangiam P., et al. A new mechanistic framework for evaluation of cyclic behaviour of unsaturated unbound granular materials. *International Journal of GEOMATE* 13(39), 111–123 (2017).

32. Pratibha R., Sivakumar Babu, G.L., Madhavi Latha, G. Stress–Strain Response of Unbound Granular Materials Under Static and

Cyclic Loading. *Indian Geotech J.* 45(4), 449–457 (2015).

33. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. *Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements*. London, 161–174 (1972).

34. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003, 189 p.

35. Austin A. Fundamental characterization of unbound base course materials under cyclic loading. MScE Thesis. Louisiana Tech. University, Louisiana, USA. 2009, 95 p.

36. Ashtiani R.S. Anisotropic characterization and performance prediction of chemically and hydraulically bounded pavement foundations. Ph.D. thesis, Texas A&M University, Texas, USA. 2009, 353 p.

37. Александров А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки / А.С. Александров // Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 22 – 34.

38. Anochie-Boatehg J. Advanced testing and characterization of transportation soils and bituminous sands. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, USA, 2007.

39. Boyce, J.R. The Behavior of a Granular Material under Repeated Load, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 1976.

REFERENCES

1. Nguyen T.D., Le L.X. (2016). Research of asphalt pavement rutting on national roads in Vietnam. Electronic resource: access mode [https://www.researchgate.net/publication/307373551]. Data 30.07.2019.

2. NRC CNRC. Rut Mitigation Techniques at Intersections. *Road and Sidewalks, Federation of Canadian Municipalities and National Research Council*, Canada. 2003: 48.

3. Larry Santucci. *Rut resistant asphalt pavements*. Electronic resource: access mode [https://ru.scribd.com/document/36152416]. Data 30.07.2019.

4. Dawson A., et al. Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. *Transportation Research Board Low Volume Roads Conference*. 2007.

5. Dawson A., Kolisoja, P., Vuorimies, N. Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. 2008: 46.

6. Brito L.A.T. *Design methods for low vol-*

ume roads. *PhD Thesis*. The University of Nottingham. Department of civil engineering. 2011: 223.

7. Rodezno M.C., Kaloush K. Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design*. 2011; 12(2): 423–439.

8. Martinez Díaz M., Pérez I. Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements. *Revista de la Construcción*. 2015; 14(1): 32–40.

9. Gercog V.N., Dolgikh G.V., Kuzin N.V. Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 5(57): 45–57 (in Russian).

10. Li Q., Xiao D.X., Wang K.C.P. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*. 2011; 19(2): 114–133.

11. Guo X., Timm D.H. Automating Mechanistic-Empirical Pavement Design Calibration Studies. *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*. 2016: 309–319.

12. AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 2008: 216.

13. Bowles J.E. Foundation analysis and design 5th edition. Singapore: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997: 1207.

14. Kezdi A., Rethati L. *Soil Mechanics of Earthworks, Foundations and Highway Engineering*, Handbook of Soil Mechanics, Elsevier, Volume 3. 1988: 361.

15. Pantelidis L. Determination of soil strength characteristics performing the plate bearing test. In processing 3rd International Conference „Modern Technologies in Highway Engineering” Poznań, 8–9 September. 2005: 497–506.

16. Hirakawa D. et al. Relationship between sand ground stiffness values from FWD and from plate loading tests, *Japanese Geotechnical Journal*. 2008; Vol. 3, No.4: 307–320. (in Japanese).

17. Bamrungwong C. et al. Development Of A Falling weight deflectometer (FWD) for evaluating the pavement conditions. *ATRANS Research Report 2008*. Bangkok, Thailand, 147 p. (2009).

18. Kongkitkul W. et al. Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer *ATRANS Research*. 2010; Volume 2, Issue 1: 14 p.

19. Su. K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements. First

International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. Beijing. 2008: 486–491.

20. Moghaddam T.B., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*. 2011; 6(4): 670–682.

21. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Effect of vertical stress rest period on deformation behaviour of unbound granular materials: Experimental and numerical investigations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018.

22. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Permanent deformation prediction model of unbound granular materials for flexible pavement design. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2018: 1–17.

23. Ling X. et al. Permanent Deformation Characteristics of Coarse Grained Subgrade Soils under Train-Induced Repeated Load. *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2017, Article ID 6241479, 15 p.

24. Hornych P., A. El Abd, Selection and evaluation of models for prediction of permanent deformations of unbound granular materials in road pavements. *Work Package*. 2004: 5.

25. Margan N.A. et al. Deformational properties of unbound granular pavement materials. *Processing 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure–Cetra*. 2014: 649–656.

26. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. *Acta Geophysica*. 2014; 62(5): 1127–1145.

27. Rahman M.S., Erlingsson S. Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015; 16(7): 587–601.

28. Salour F., Erlingsson S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. *Procedia Engineering* (143). 2016: 300–307.

29. Salour F., Erlingsson S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*. 2017; 18(3): 236–246.

30. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *MATEC Web of Conferences* (195), Article Number 03010, 1–7 (2018).

31. Jitsangiam P., et al. A new mechanistic framework for evaluation of cyclic behaviour of unsaturated unbound granular materials. *International Journal of GEOMATE*. 2017; 13(39): 111–123.

32. Pratibha R., Sivakumar Babu, G.L., Madhavi Latha, G. Stress–Strain Response of Unbound Granular Materials Under Static and Cyclic Loading. *Indian Geotech J.* 2015; 45(4): 449–457.

33. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. *Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements*. London 1972: 161–174.

34. Werkmeister S. *Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions*. Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003: 189.

35. Austin A. *Fundamental characterization of unbound base course materials under cyclic loading*. MScE Thesis. Louisiana Tech. University, Louisiana, USA. 2009: 95.

36. Ashtiani R.S. Anisotropic characterization and performance prediction of chemically and hydraulically bounded pavement foundations. Ph.D. thesis, Texas A&M University, Texas, USA. 2009: 353.

37. Aleksandrov A.S. Plastic deformation granodiorite gravel and sand and gravel when exposed to cyclic loading triaxial. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 4: 22–34 (in Russian).

38. Anochie-Boatehg J. Advanced testing and characterization of transportation soils and bituminous sands. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, USA, 2007.

39. Boyce, J.R. The Behavior of a Granular Material under Repeated Load, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 1976.

Поступила 23.04.2019, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

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),

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 0000-0002-5534-6338 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: nata26.74@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy S. Aleksandrov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of 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 – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of 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).

Natalya P. Aleksandrova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0002-5534-6338 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: nata26.74@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. – Разработка методики обработки экспериментальных данных, определяющих параметры аналитических решений; анализ экспериментальных данных по трехосному сжатию различных зернистых материалов и определение параметров, полученных степенных и логарифмических функций; формулирование задач дальнейших исследований; написание введения и заключения.

Семенова Т.В. – Анализ моделей расчета остаточных деформаций, накапливаемых зернистыми материалами при воздействии повторных нагрузок; проверка статьи.

Александрова Н.П. – Исследование возможности применения, полученных решений, для расчета смещения поверхности слоев дорожной одежды из зернистых материалов с применением интегрального исчисления для аналитического решения задачи о зависимости остаточной деформации от числа повторных нагрузок, величины главных напряжений.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anatoliy S. Aleksandrov – development of methods for processing experimental data that determine the parameters of analytical solutions; analysis of experimental data on the three-axis compression of various granular materials and determination of the parameters obtained power and logarithmic functions; formulation of further research; writing the introduction and conclusion.

Tatiana V. Semenova – analysis of models for calculating the residual deformation accumulated

by granular materials under the influence of repeated loads; checking of the article.

Natalia P. Aleksandrova – investigation of the possibility of using the obtained solutions to calculate the displacement of the surface of the pavement layers of granular materials using integral calculus for analytical solution of the dependence of the residual deformation on the number of repeated loads, the magnitude of the main stresses.

УДК 625.85.32

МОДИФИКАЦИЯ БИТУМА ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ

К.В. Беляев*, И.Л. Чулкова
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
Россия, г. Омск
*bkv775@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Известно, что причинами преждевременного разрушения асфальтобетонных покрытий являются старение и невысокое качество выпускаемых битумов. В статье рассмотрены применяемые способы улучшения свойств битума. Произведён обзор результатов модификации битума с помощью технического углерода. Показано, что введение технического углерода приводит к структурным изменениям в битуме. На основании проведённого обзора в качестве перспективных модификаторов выделены добавки на основе технического углерода.

Материалы и методы. Приведены характеристики применяемых углеродных модификаторов и свойства исходного битума.

Результаты. Экспериментально определены основные показатели модифицированного битума. Произведено сравнение влияния трёх добавок технического углерода на свойства битума. Введение активированного технического углерода снижает пенетрацию битума значительно, чем введение неактивированного, однако при этом ухудшаются показатели старения.

Обсуждение и заключение. Установлено, что введением твёрдой добавки можно увеличить вязкость битума при сохранении других характеристик, требуемых стандартами, и таким образом улучшить его тепловую устойчивость. Введение активированного технического углерода в сухом виде не оказывает существенного положительного влияния на свойства битума, в отличие от сортового углерода марки №375.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битум, наноматериалы, модификаторы, технический углерод, асфальтобетон.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы благодарят разработчиков добавок О.Н. Бакланову и О.А. Княжевву, работников Института проблем переработки углеводородов СО РАН, г. Омск.

© К.В. Беляев, И.Л. Чулкова



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

CARBON MODIFICATION OF BITUMEN

K.V. Belyaev*, I. L. Chulkova

Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

*bkv775@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The causes of premature destruction of asphalt concrete coatings are aging and low quality of bitumen. The paper describes the methods for improving the bitumen properties. The authors present the review of the bitumen modification by carbon black usage. The usage of carbon black leads to structural changes in the bitumen. Therefore, the authors select carbon black additives as a promising modifiers.

Materials and methods. The paper showed the characteristics of carbon modifiers and the properties of the initial bitumen.

Results. The authors experimentally determined the main parameters of the modified bitumen and compared the effect of three carbon black additives on the bitumen properties. The usage of activated carbon black significantly reduced the penetration of bitumen than non-activated carbon black, however, the indicators of aging were declined.

Discussion and conclusions. As a result, the solid additive's usage increases the bitumen viscosity with other standard characteristics' preservation, and thus improves the bitumen thermal stability. Therefore, the usage of activated carbon black in dry forms does not affect significantly on the bitumen properties in comparison with varietal N 375 grade-carbon.

KEYWORDS: bitumen, nanomaterials, modifiers, carbon black, asphalt concrete.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the developers of additives, O.N. Baklanov and O.A. Knyazeva, and also to employees of the Institute of Hydrocarbons' Processing Problems in the Siberian Department of the Russian Academy of Science, Omsk.

© K.V. Belyaev, I. L. Chulkova



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

ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетонные покрытия широко применяются в России и многих других странах. Качество их строительства во многом определяют не только удобство и комфорт в эксплуатации, но и долговечность всей автомобильной дороги. Важнейшим компонентом асфальтобетона, определяющим многие его показатели, является вяжущий материал – битум^{1, 2}.

От свойств битума зависят устойчивость покрытия к погодным условиям, прочность, долговечность и т.д. Направленным регулированием свойств битума можно добиться значительного улучшения срока службы покрытий.

В нашей стране применяются преимущественно окисленные битумы, для которых характерны низкая долговечность и температурная устойчивость [1]. Изначально низкий ресурс срока службы вяжущих создаёт серьёзные проблемы в дорожной отрасли, снижая долговечность построенных автомобильных дорог и требует новых, перспективных подходов к улучшению свойств битумов с учётом современного уровня развития науки.

Основной причиной разрушения покрытий при условии соблюдения технологии строительства является нарушение структурных связей между компонентами асфальтобетона в результате изменения свойств битума в процессе эксплуатации. Под действием нагрузок, окисления, полимеризационных процессов на поверхности битума и т.д. происходят его старение и разрушение структуры³.

При рассмотрении структуры битума его состав делят на группы (асфальтены, смолы и масла), из которых образуются молекулярные ассоциаты, также называемые самостоятельными структурными единицами (ССЕ). К наиболее крупным ССЕ относят асфальтены. Количество, размер и степень взаимодействия ассоциатов определяют прочность и реологические свойства вяжущего. Рентгеновскими исследованиями установлено, что в нефтепродуктах присутствуют частицы размером от 2,3 до 12 нм⁴.

В процессе старения меняется химический и групповой составы битума, уменьшается его

способность к релаксации напряжений. Силы адгезии между минеральным заполнителем и вяжущим ослабевают, и под действием нагрузок в асфальтобетонном покрытии начинают появляться различные дефекты – трещины, шелушения, выкрашивание щебня и др. Таким образом, можно сказать, что из всех компонентов асфальтобетона именно битум определяет долговечность покрытия.

Наблюдения за состоянием асфальтобетонных покрытий показывают, что в последние десятилетия их срок службы значительно сократился [1]. Восстановить баланс между возросшей нагрузкой на дороги и качеством производимого битума можно с помощью модификации битумов. Для этого необходимо создать такую структуру вяжущего материала, которая будет более устойчива к внешним нагрузкам и более долговечна (обладать меньшей склонностью к старению).

Улучшение свойств битумов производится по двум основным направлениям: компаундирование на стадии производства и модификация на стадии выпуска товарной продукции [2, 3].

Компаундирование представляет собой вторичный процесс переработки битумов, который производят чаще всего на нефтеперерабатывающих заводах.

Модифицированными называют битумы, улучшенные добавками определенных веществ (полимерами, резиновой крошкой, серой, адгезионными добавками и др.). Цель модификации заключается не только в соответствии битума требованиям ГОСТа, но и в улучшении его свойств путём снижения температурной чувствительности вяжущего, т.е. увеличении его твердости летом и уменьшении зимой, а также придании вяжущему эластичности – способности к обратимым деформациям во всем диапазоне эксплуатационных температур. В результате модификации вяжущего асфальтобетон приобретает повышенную сдвигоустойчивость, низкотемпературную трещиностойкость и усталостную долговечность.

Для модифицирования битумов применяют самые различные добавки: разжижающие,

¹ Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королёв И.В. Дорожный асфальтобетон. М. : Транспорт, 1985. 350 с.

² Колбановская А. С., Михайлов В. В. Дорожные битумы. М. : Транспорт, 1973. 261 с.

³ Там же.

⁴ Дияров И.Н., Батуева И.Ю., Садыков А.Н., Солодова Н.Л. Химия нефти. Л. : Химия, 1990. 240 с.

пластифицирующие, структурирующе-пластифицирующие, адгезионные, адгезионно-структурирующие, структурирующие, эмульгаторы и т.д.

Существенным недостатком многих модификаторов является технология их введения, требующая длительного перемешивания при высокой температуре (1,5...2 ч при температуре 140–160 °С). Применяемые модификаторы (приведены на рисунке 1) отличаются между собой составом, размером и механизмом действия. Некоторые добавки существенно отличаются по своему химическому составу от битума – например, добавки золя гидроокиси железа [4].

Физический метод улучшения битума осуществляется с помощью СВЧ-активации, ультразвуковой обработкой, воздействиями магнитного, акустического или электромагнитного полей, кавитацией и т.д.

В работе [5] перед формованием образцов битум подвергался СВЧ-излучению, в течение от 30 с до 4 мин. По результатам опытов установлена зависимость улучшения адгезии битума из-за процессов окисления, происходящих под действием волн сверхвысоких частот.

В г. Харькове под руководством В.А. Золотарёва⁵ [6] производилась ультразвуковая обработка битума. В результате экспериментов установлено, что при ультразвуковом воздействии происходит снижение вязкости битума, диспергирование частиц, находящихся в зоне действия ультразвука, повышение однородности материала, ускорение или инициирование реакций взаимодействия между контактирующими фазами. Управление воздействием ультразвука, таким образом, позволяет направленно изменять свойства обрабатываемого битума в зависимости от режимов нагружения.

В работе [7] предлагается воздействовать на углеводородное сырьё магнитным полем на стадии получения битума, что позволяет интенсифицировать процессы переработки, однако этот способ пока не нашёл широкого применения из-за сложности оборудования и не позволяет модифицировать битум небольшими партиями по требованию заказчика.

К общим недостаткам применения физических способов модификации битумов можно отнести необходимость сложного технологического оборудования, увеличения продол-



Рисунок 1 – Основные способы модификации битумов
Figure 1 – Main methods of bitumen modification

жительности подготовки битума, повышение энергозатрат и капитальных вложений.

Частично этих недостатков лишены методы модификации битума, основанные на химических способах.

Рядом исследований⁶ [8, 9, 10, 11] установлено, что значительное влияние на результат введения добавок оказывает размер их частиц. Уменьшение размера добавок до наночастиц позволяет получить качественно новые свойства вяжущего материала. Размеры наночастиц занимают промежуточное значение в ряду при переходе от кристаллов к отдельным молекулам и атомам, которые предопределяют их особые свойства по сравнению с кристаллами, молекулами и атомами.

С позиции закона сродства структур материалов [12] модификатор по своему химическому составу должен быть близок к химическому составу битума. С позиции улучшения свойств модификатор должен обладать сходными размерами с теми компонентами битума, которые в наибольшей степени определяют его свойства. Материалом, удовлетворяющим этим требованиям, является технический углерод (ТУ).

Технический углерод представляет собой тонкодисперсное порошкообразное вещество,

⁵ Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков : Вища школа, 1977. 116 с.

⁶ Запорожцова И.В. Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе. Волгоград : Изд-во ВолГУ. 2009. 490 с.

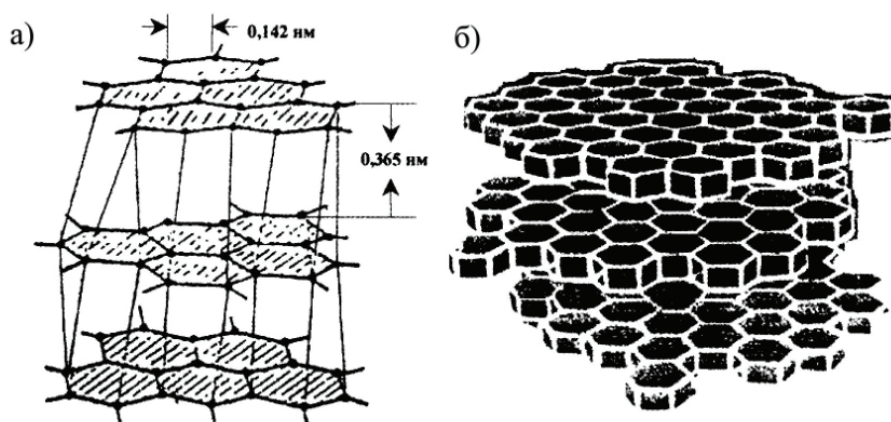


Рисунок 2 – Структура частиц технического углерода:
а – расположение углеродных решеток в кристаллите;
б – плоская углеродная решетка кристаллита

Figure 2 – Structure of carbon black particles:
a – carbon lattices in the crystallite;
b – flat carbon crystallite lattice

состоящее из углерода, получаемого сжиганием или термическим разложением газообразных или жидких углеводородов. Основным потребителем технического углерода является шинная промышленность – 70% производимого углерода, около 20% расходуется на изготовление других резиновых изделий и 10% применяется в областях, не связанных с резиной. Объем производства ТУ в мире превышает 7 млн т в год. Потребность в техническом углероде обусловлена его свойствами, усиливающими прочность резин и снижающими их старение.

Влияние техуглерода на модифицируемую среду зависит от размера, формы, свойств поверхности [13] и наличия на ней функциональных групп. Методом дифракции рентгеновских лучей установлено, что структурными элементами частиц технического углерода являются плоские кристаллические решетки (рисунок 2, а). Они состоят из шестичленных углеродных циклов (аналогичных бензольным по расположению углеродных атомов). Атомы углерода образуют слои сконденсированных кольцеобразных систем с межатомным расстоянием 0,142 нм. Эти слои (решетки) располагаются

параллельно на строго определенном расстоянии, равном 0,365 нм. Частицы технического углерода состоят из отдельных первичных образований – кристаллитов (рисунок 2, б).

Таким образом, частицы технического углерода обладают размерностью, относительно близкой к размерам асфальтенов. Частицы серийно производимого технического углерода представляют собой сферические глобулы и обладают большой удельной поверхностью.

Поэтому при смешивании частиц ТУ с битумом на его поверхности формируется слой, образованный из масел и смол, образуя структуру в виде «ежа»⁷, а также заполняются пустоты. Результатом является перераспределение компонентов битума между ССЕ и образование новых ассоциатов. Образование дополнительных дисперсных частиц усиливает матрицу материала, повышаются вязкость и прочность. Кроме того, связывая лёгкие компоненты битума, ТУ замедляет процессы старения.

В литературе приводятся положительные результаты применения ТУ для модификации битума [8, 14, 15], однако не всегда указываются марка и свойства ТУ, из-за чего сложно анализировать его воздействие на битумы.

⁷ Запороцкова И.В. Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2009. 490 с.

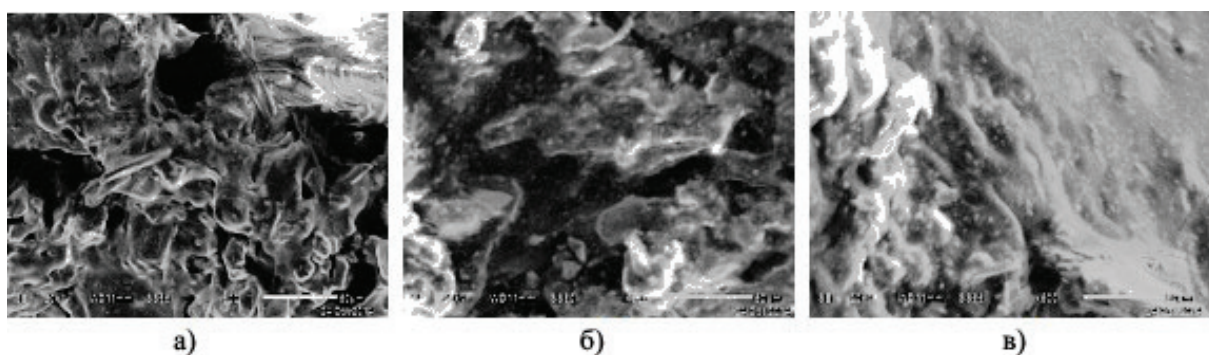


Рисунок 3 – Электронно-микроскопический анализ модифицированного асфальтобетона:
а – бездобавочный асфальтобетон; б – битум + 0,05 масс.% УНМ; в – битум + 0,1 масс.% УНМ

Figure 3 – Electron microscopic analysis of modified asphalt concrete:
a – non-additive asphalt concrete; b – bitumen + 0.05 wt.% CNM;
c – bitumen + 0.1 mass.% CNM

В работе Н.И. Шестакова⁸ битум модифицировали углеродными наномодификаторами (УНМ). Опытным путём установили оптимальное содержание добавки в 0,1% от количества битума. При таком содержании углерода происходит расширение интервала пластичности битума, при высоких температурах уменьшается пенетрация. Введение добавки повышает прочность асфальтобетона при 50°C на 58% для фуллеренсодержащего модификатора (ФСМ) и на 46% для фуллеренсодержащей сажи (ФСС).

Электронно-микроскопический анализ проб асфальтобетона [4] показал изменение структуры при модификации (рисунок 3).

По микрофотографиям образцов поверхности битума видно, что при введении УНМ структура материала становится более плотной. Это подтверждает предположение о том, что при введении и повышении концентрации добавки в составе битума возрастает количество ассоциатов и, следовательно, рост плотности образования полимерной матрицы, что в свою очередь и повышает прочностные характеристики.

Авторы [8] исследовали влияние введения углеродной добавки таунит в сочетании с различными наполнителями (древесная пыль, керамзит и др.) в битум при изготовлении мастик. Установлено, что введение наполнителя как армирующего элемента увеличивает проч-

ность материала. Наличие таунита незначительно повышает температуру размягчения для горячих мастик – на 0,5°C, для холодных – на 1,5...2°C. В целом физические, теплотехнические и механические характеристики битумных мастик улучшились на 2...5%.

В исследованиях [16] производилась модификация битума БНД 60/90 различными добавками – 4% технического углерода, 0,4% поверхностно-активного вещества КАДЭМ-ВТ, 5,5% регранулята полимера этилен-пропилена (РПЭП). Введение РПЭП и ТУ повышает длительную трещиностойкость асфальтобетона на 25 и 20% соответственно после 6 циклов климатического воздействия. Сравнение между тремя добавками – техническим углеродом, КАДЭМ-ВТ и РПЭП – показало, что техуглерод замедляет старение битума значительно больше других.

Коллективом ученых СибАДИ [17] проводились исследования по улучшению свойств щебёночно-мастичного асфальтобетона добавками отходов производства технического углерода. Авторы делают вывод о возможности повышения прочности и плотности щебёночно-мастичного асфальтобетона на основе модифицированного вяжущего материала.

В работе [14] произведено сравнение влияния технического углерода, полученного после утилизации шин, и модифицированного техуглерода (окисленного). Битум марки БНД 90/130 модифицировали перемешиванием с

⁸ Урханова Л.А. и др. Улучшение свойств битума и асфальтобетона введением углеродного наномодификатора // Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоёмкие технологии и инновации». Белгород, 2014. С. 391–398.

ТУ при температуре 120 °С, в течение 40 мин. О способе введения ТУ (в сухом виде или с помощью носителя) авторы, к сожалению, не упоминают.

Согласно полученным данным, с увеличением объёма добавки для обоих модификаторов происходят увеличение температуры размягчения и снижение пенетрации. Для вяжущего с модифицированным ТУ температура размягчения увеличивается больше, чем с добавкой ТУ. С увеличением количества добавок значение дуктильности вяжущего увеличивается. Результаты определения адгезии полученного битума к каменному материалу показывают, что при добавлении ТУ до 3% масс улучшается адгезия.

В работе [15] для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетона предлагается добавлять технический углерод в количестве 5% от содержания битума. Однако автор не приводит сведений о марке применяемого углерода, его свойствах и технологии модификации.

Обобщая рассмотренные результаты, можно заметить следующее:

1. Количество вводимого углерода у разных исследователей значительно отличается.

2. Авторы не приводят полные данные о методике модификации, отсутствует исчерпывающая информация о применяемых материалах.

Научная новизна работы заключается в результатах исследования процессов, происходящих при модификации битума техническим углеродом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью работы является исследование влияния технического углерода различных видов и размеров на свойства битума. В связи со значительной трудоёмкостью проводимых экспериментов в работе определены основные свойства битума по стандартным методикам.

В качестве исходного использовался битум марки БНД 70/100 производства АО «Газпромнефть - Омский НПЗ». Перед модификацией битум был проверен на соответствие требованиям ГОСТ 33133–2014. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

В качестве добавок в работе использовали печной технический углерод марки N375, произведенный на предприятии ОАО «Омсктехуглерод», и образцы активированного технического углерода №41с и №42с (далее добавки №375, №41с и №42с), полученные на основе марки №375 и предоставленные разработчиками этих добавок О.Н. Баклановой и О.А. Княжевой – работниками Института проблем переработки углеводородов СО РАН г. Омск [18]. Характеристика марки N375 приведена в таблице 2. Активацию добавок проводили механическим путём на планетарной мельнице [18]. В результате помола на поверхности углерода добавки №41с увеличилось количество кислородсодержащих групп до 0,34 мэкв/г. Добавка №42с представлена с увеличенной длиной углеродной цепи. Размер добавок №41с и №42с определён методом лазерной дифракции. Большая часть агрегатов ТУ после механической активации имеет

Таблица 1
Свойства исходного битума

Table 1
Properties of the original bitumen

Показатель	Метод испытания	Нормативные значения по ГОСТ 33133–2014	Фактические значения
Глубина проникания иглы 0,1 мм при температуре 25 °С	ГОСТ 33136-2014	70/100	92
Глубина проникания иглы 0,1 мм при температуре 0 °С	ГОСТ 33136-2014	Не менее 21	52
Растяжимость, см, при температуре 25 °С	ГОСТ 33138-2014	Не менее 62	80,5
Температура размягчения по КиШ, °С	ГОСТ 33142-2014	Не ниже 47	50
Температура хрупкости, °С	ГОСТ 33143-2014	Не выше -18	- 22
Изменение массы образца после старения, %, не более	ГОСТ 18180-72	0,6	0,51
Изменение температуры размягчения после старения, 0 °С, не более	ГОСТ 18180-72	7	1,6

Таблица 2
Физико-химические показатели технического углерода марки n375

Table 2
Physic and chemical characteristics of n375 mark carbon black

№	Показатель	Значение
1	Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	96
2	Абсорбция дибутилфталата, см ³ /100г	87
3	pH водной суспензии	6 – 8
4	Содержание золы, % мас	0,22
5	Насыпная плотность, кг/м ³	280
6	Количество кислородсодержащих групп, мэкв/г	0,12
7	Массовая доля остатка, %, после просева через сито с сеткой: 0,045 мм 0,5 мм	0,001 0,08
8	Массовая доля пыли (мелких частиц) в гранулированном углероде, %	7,0

размер частиц менее 1 мкм, а остальная часть представлена агрегатами с размерами 1–4 мкм [18].

Модификацию битума проводили следующим образом. В металлический стакан загружали определённый объём битума и нагревали его до температуры 120–140 °С. Когда битум расплавлялся, в него добавляли необходимый объём технического углерода, и мик-

сером перемешивали в течение 40 мин. После этого определяли основные характеристики по ГОСТ 33133–2014. Результаты экспериментов представлены на рисунках 4–5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все добавки вводили от 0,05 до 1,5% от массы битума. Исследование пенетрации проводили при 25 и 0 °С (рисунок 4).

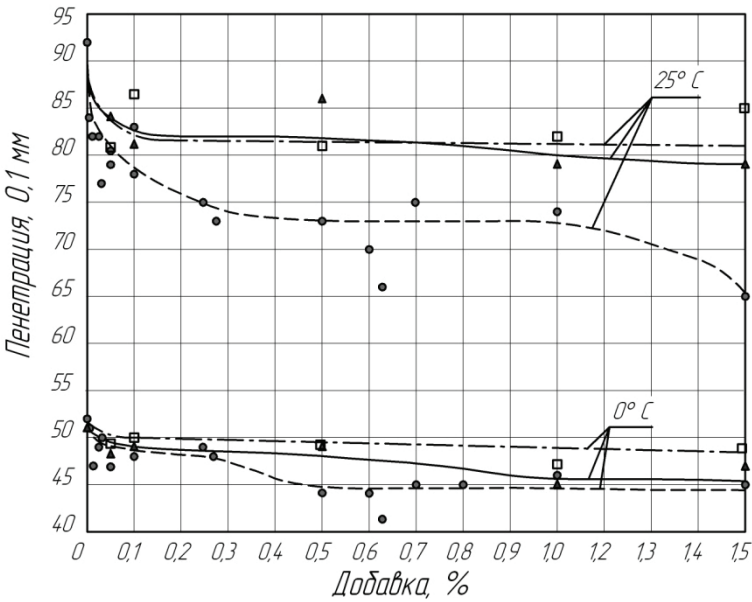


Рисунок 4 – Влияние добавки технического углерода на пенетрацию битума:
— добавка №375;
- - - - - добавка 41С;
- . - . - . - добавка 42С

Figure 4 – Effect of carbon black additive on the bitumen penetration:
— additive №375;
- - - - - additive 41C;
- . - . - . - additive 42C

Установлено, что введение добавок №375 и №42с в количестве 0,15% снижает пенетрацию при 25 °С на 11%. При увеличении концентрации этих добавок с 0,15 до 1,5% пенетрация уменьшается незначительно – на 2,5%. При 0 °С пенетрация для №375 более активно снижается (на 9%), введение №375 от 0,1 до 1,5 % снижает пенетрацию незначительно.

Вязкость битума с добавкой №41с изменяется ступенчато: в диапазоне концентрации добавки от 0 до 0,3% пенетрация при 25 °С упала на 20%, в диапазоне 0,3...1,0% осталась стабильной, с увеличением от 1 до 1,5% снизилась ещё на 12%.

При 0 °С концентрация трёх добавок до 0,3% не оказывает значительного воздействия. Введение от 0,3 до 0,5% снижает пенетрацию битума с добавкой №41с на 7%, после чего увеличение объёма добавки не оказывает влияния. Добавка №42с линейно снижает пенетрацию битума на 5% при увеличении концентрации от 0 до 1,5%. При введении до 1,5% добавки №375 пенетрация линейно снижается на 12%. Значения пенетрации с объёмом добавок 1,5% №375 или №41с практически одинаковы.

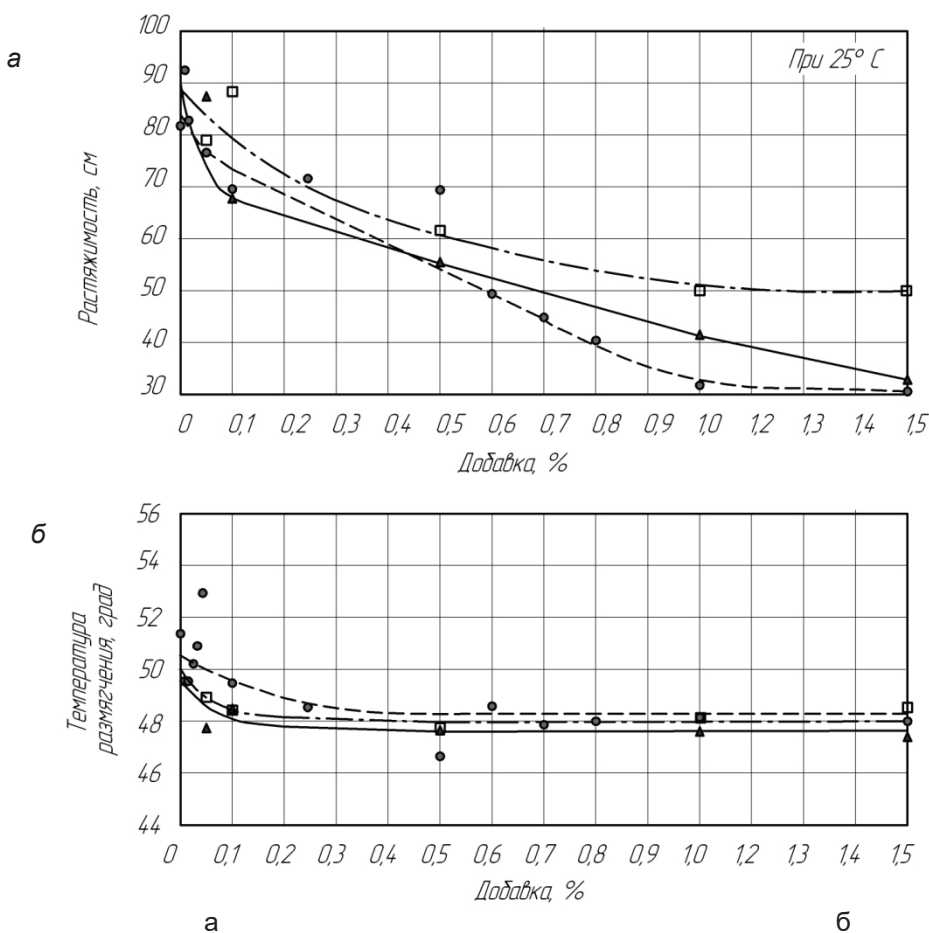


Рисунок 5 – Влияние добавки технического углерода:
а – на растяжимость битума; б – на температуру размягчения битума;

— добавка №375;
- - - - - добавка 41с;
- . - . - . - добавка 42с

Figure 5 – Effect of carbon black additive:
а – on a stretch of bitumen; б – softening point of bitumen;

— additive №375;
- - - - - additive 41C;
- . - . - . - additive 42C

Таблица 3
Результаты исследования старения битума

Table 3
Results of the bitumen aging research

Название добавки	Количество добавки, %	Уменьшение массы, %	Температура размягчения после старения, °С
Без добавки	0	0,51	48,4
№375	0,3	0,54	52,0
№41с	0,3	1,57	50,0
№42с	0,3	0,73	48,4
№375	1,0	0,69	48,5

Растяжимость битума (рисунок 5, а) наиболее интенсивно уменьшается (на 10%) при введении добавок №41с и №42с в диапазоне 0...0,2%.

Снижение дуктильности битума с добавками №375 и №42с носит равномерный спадающий характер. При этом битум с добавкой №375 снижает растяжимость на 10% больше, чем с добавкой №42с для концентраций 0,1...0,85%, после чего разрыв увеличивается до 36% при увлечении концентрации до 1,5%.

Увеличение концентрации углерода наиболее активно снижает растяжимость битума с добавкой №41с при введении более 0,5%.

Добавки №375 и №41с в количестве 1,5% снижают растяжимость битума на 63%. Растяжимость при введении 1,5% добавки №42с снизилась на 38%.

Температуру размягчения определяли по методу «кольцо и шар» (КиШ). При концентрации добавок от 0 до 0,2% температура размягчения для всех составов снизилась на 4%, после чего практически не менялась (рисунок 6, б).

При исследовании влияния рассмотренных добавок на старение битума определяли изменение массы битума после прогрева по ГОСТ 18180–72, а также температуру размягчения после прогрева. Результаты представлены в табл. 3.

После прогрева самые низкие значения уменьшения массы наблюдаются у вяжущего с добавкой №41с – потеря массы больше, чем у исходного битума почти в три раза. Немного лучше выглядит образец битума с добавкой

№42с – потеря массы составила на 43% больше в сравнении с исходным. У битума с добавкой №375 масса уменьшилась практически так же, как у исходного битума.

Проверка изменения температуры размягчения битума после прогрева показала, что этот показатель увеличился после введения добавки №375 в количестве 0,3% на 2 °С в сравнении с исходным битумом. У остальных образцов температура размягчения битума после прогрева уменьшилась, но не вышла за пределы, требуемые ГОСТ 33133–2014.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение добавки №41с увеличивает вязкость битума при 25 °С значительно, чем добавка №375. При концентрации ТУ от 0 до 0,3% разница в пенетрации увеличивается, с ростом концентрации добавки разница пенетрации составляет около 12%.

При введении добавок в битум в диапазоне 0,2...0,5% дуктильность выше у вяжущего с добавкой №41с. При введении добавки 0,6% и выше дуктильность выше у вяжущего с добавкой марки №42с. Дуктильность характеризует пластические свойства битумов, носителем которых являются смолы. С увеличением концентрации добавок молекулы смол начинают присоединяться к новым ассоциатам и вяжущее теряет свою пластичность.

Исследования битумов⁹ показали, что битумы, имеющие высокие значения дуктильности, могут не сохранить её в процессе эксплуатации. И наоборот, битумы имевшие

⁹ Руденская И. М., Руденский А. В. Органические вяжущие для дорожного строительства. М. : Транспорт, 1984. 229 с.

значение дуктильности ниже требуемого ГОСТом, сохраняли его в течение срока службы асфальтобетонного покрытия.

Температура размягчения немного выше для вяжущего с добавкой №41с, однако в целом разница между ними невелика.

Разницу более сильного влияния добавки №41с на вязкость битума можно объяснить меньшими размерами частиц. Введение мелких частиц изменяет групповой состав битума, адсорбируя на своей поверхности масла. Вследствие образования новых ассоциатов возрастает вязкость всей системы.

Проверка битума на старение не показала улучшения свойств битума с добавками №41с и №42с. Можно предположить, что технический углерод после его введения адсорбировал на своей поверхности группы углеводородов, обладающих наибольшей адгезией (смолы), выделив из жидкой фазы масла. Поэтому при прогреве они оказались менее связанными и испарялись. Разница в потере массы при введении добавок №41с и №42с объясняется тем, что добавки имеют различные функциональные группы, находящиеся на их поверхности, которые адсорбируют на себя различное количество групп углеводородов.

Для вяжущего с добавкой марки №375, которая имеет меньшую дисперсность из всех добавок, установлено самое высокое значение температуры размягчения битума после прогрева (52° С). В работе [18] установлено, что при увеличении дисперсности технического углерода происходит агрегирование частиц в крупные агломераты. При перемешивании битума с высокодисперсной добавкой происходит агрегация частиц технического углерода и их поверхность не полностью покрыта битумом. По этой причине частицы ТУ добавки марки №375 оказались более полно задействованы после перемешивания. Поскольку образовалось меньшее количество новых ассоциатов, они более равномерно сохранили различные группы углеводородов в процессе нагрева. При этом образовавшиеся ассоциаты обладают большей прочностью (проявилось усиливающее прочность свойство ТУ), что несколько повысило температуру размягчения.

Уменьшение жидкой фазы в составе битума повысило его твердость и, как следствие, привело к увеличению температуры размягчения.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Рациональным количеством добавки следует полагать 0,15...0,3% технического углерода марки №375. В этом случае при относительно небольшом количестве модификатора можно довести пенетрацию до 82 ед. (вместо 92 ед. исходного битума), при этом растяжимость и температура размягчения соответствуют марке БНД 70/100.

2. Установлено, что введение мелкодисперсного технического углерода в сухом виде не оказывает существенного положительного влияния на свойства битума, в отличие от неактивированного углерода добавки №375.

3. Применение добавки №375 не требует дополнительной активации, но при этом позволяет повысить вязкость битума и, следовательно, улучшить его температурную устойчивость в пределах одной марки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуреев, А.А., Коновалов А.А., Самсонов В.В. Состояние и перспективы развития производства дорожных вяжущих материалов в России // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2008. №1. С.12–16.
2. Джумаева О.Н., Солодова Н.Л., Емельянычева Е.А. Основные тенденции производства битумов в России // Вестник технологического университета. Изд-во КНИИТУ. 2015. Т. 18, № 20. С. 132–136.
3. Руденский А.В. Битумные вяжущие улучшенного качества, модифицированные, комплексные, композиционные // Дороги и мосты. 2007. №2. С. 208–214.
4. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Разработка наномодификаторов и исследование их влияния на свойства битумных вяжущих веществ // Вестник МГСУ. 2013. №10. С.131–139.
5. Акимов А.Е., Ядыкина В.В., Гридчин А.М. Применение токов СВЧ для повышения характеристик дорожных битумов // Строительные материалы. 2010. №1. С.12–14.
6. Золотарев В.А., Маляр В.В., Лапченко А.С. Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом режиме деформирования // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. №1. С.10–13.
7. Пивоварова Н.А. Природа влияния постоянного магнитного поля на нефтяные дисперсные системы // Нефтепереработка и нефтехимия. 2004. №10. С.20–25.
8. Ярцев В.П., Долженкова М.В., Петрова Н.В. Влияние наполнителей и нанодобавок на эксплуатационные свойства композитов

на основе битума // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. С. 801–809.

9. Жуков М.О., Толчков Ю.Н., Михалева З.А. Исследование возможности применения модификаторов на основе углеродных наноструктур в технологии эффективных строительных материалов // Молодой ученый. 2012. №5. С.16–20.

10. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А. Влияние углеродных нанотрубок на свойства ПБВ и асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2015. №11. С.110–119.

11. Кожитов Л.В., Запороцкова И.В., В Козлов В. Перспективные наноматериалы на основе углерода // Вестник ВолГУ. 2009. Серия 10. Вып. 4. С. 63–85.

12. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении // Фундаментальные исследования. 2014. № 3. Ч. 2. С. 267–271.

13. Шадрин В.В., Корнев Ю.В., Гамлицкий Ю.А. Изменение свойств резины в результате модификации поверхности частиц углеродного наполнителя // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. №3. С.41–410.

14. Абдуллин А.И., Емельянычева Е.А. Использование технического углерода в качестве добавки к дорожным битумам // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 2. С. 275–280.

15. Левкович Т.И., Беляков А.И., А Билько.Е., Тищенко А.С. О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Приволжский научный вестник. 2016. №1. С.48–53.

16. Углова Е.В., Бессчетнов Б. В. Длительная трещиностойкость асфальтобетона дорожных покрытий // Вестник ВолГАСУ. 2011. №23 (42). С.103–109.

17. Соколов Ю.В. и др. Исследование структуры и свойств концентрированных битумных мастик на основе битумов и технического углерода // Строительные материалы. 2005. № 5. С. 10–11.

18. Бакланова О.Н. и др. Влияние параметров механической активации на изменение размеров агрегатов, текстуры и функционального состава поверхности технического углерода // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. Вып. 12. С.1654–1662.

REFERENCES

1. Gureev A. A., Konovalov A. A., Samsonov V. V. Sostojanie i perspektivy razvitiya proizvodstva dorozhnyh vjzhushhih materialov v Rossii [State and prospects of the road binders' production in Russia]. *Mir nefteproduktov. Vestnik nefjtjanyh kompanij*. 2008; 1:12–16 (in Russian).

2. Djumaeva O.N., Solodova N.L., Malanicheva E.A. Osnovnye tendencii proizvodstva bitumov v Rossii [Main trends in the production of bitumen in Russia]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta. Publishing house of the computer science and informational technologies*. 2015; 18(20):132–136 (in Russian).

3. Rudensky A.V. Bitumnye vjzhushhie uluchshennogo kachestva, modifitsirovannye, kompleksnye, kompozicionnye [Bitumen binders of improved quality, modified, complex, composite]. *Dorogi i mosty*. 2007; 2: 208–214 (in Russian).

4. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Razrabotka nanomodifikatorov i issledovanie ih vlijaniya na svojstva bitumnyh vjzhushhih veshhestv. *Vestnik MGSU*. 2013; 10: 131–139 (in Russian).

5. Akimov A.E., Yadykina V.V., Gridchin A.M. Primenenie tokov SVCh dlja povysheniya harakteristik dorozhnyh bitumov [Application of microwave currents to improve the characteristics of road bitumen]. *Stroitel'nye materialy*. 2010; 1: 12–14 (in Russian).

6. Zolotarev V.A., Painter V.V., Lapchenko A.S. Reologicheskie svojstva asfal'topolimerbetonov pri dinamicheskom rezhime deformirovaniya [Rheological properties of asphalt polymer concrete under dynamic mode]. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*. 2008; 1: 10–13 (in Russian).

7. Pivovarova N.A. Priroda vlijaniya postojannogo magnitnogo polja na nefjtjanye dispersnye sistemy [Nature of the constant magnetic field influence on oil disperse systems]. *Neftepererabotka i neftehimija*. 2004; 10: 20–25 (in Russian).

8. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V., Petrova N.I. Vlijanie napolnitelej i nanodobavok na jekspluatacionnye svojstva kompozitov na osnove bituma [Effect of fillers and additives on the performance properties of composites based on bitumen]. *Vestnik TGTU*. 2014; 20: 801–809 (in Russian).

9. Zhukov M.O., Tolchikov Yu.N., Mikhaleva Z.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya modifikatorov na osnove uglerodnyh nanostruk-

tur v tehnologiji jeffektivnyh stroitel'nyh materialov [Research of possibility of the modifiers' application on the basis of carbon nanostructures in technology of effective building materials]. *Molodoj uchenyj*. 2012; 5: 16–20 (in Russian).

10. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A. Vliyanie uglerodnyh nanotrubok na svoystva PBV i asfal'tobetona [Influence of carbon nanotubes on the properties of PBV and asphalt concrete]. *Vestnik MGSU*. 2015; 11: 110–119 (in Russian).

11. Kozhitov L.V., Zaporotskova I.V., Kozlov. *Perspektivnye nanomaterialy na osnove ugleroda* [Promising carbon based nanomaterials]. *Vestnik Volga*. 2009; 4(10): 63–85 (in Russian).

12. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Chulkova I.L. Zakon srodstva struktur v materialovedenii [Law of affinity structures in materials science]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014; 3. Part 2: 267–271 (in Russian).

13. Shadrin V.V., Kornev Yu.V., Gamlitsky Yu.A. Izmenenie svoystv reziny v rezul'tate modifikatsii poverhnosti chastic uglerodnogo napolnitelja [Change of rubber properties as a result of modification of the carbon filler particles' surface]. *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*. 2009; 3: 41–410 (in Russian).

14. Abdullin A.I., Malanicheva E.A. Ispol'zovanie tehnikeskogo ugleroda v kachestve dobavki k dorozhnym bitumam [Use of carbon black as an additive to road bitumens]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014; 2(17): 275–280 (in Russian).

15. Levkovich T.I., Belyakov A.I., And Bilko. E., Tishchenko A.S. O modifikatsii bitumov i asfal'tobetonnyh smesey dlja povysheniya sdvigoustojchivosti asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog [About modification of bitumen and asphalt concrete mixes for increase of shear resistance of asphalt concrete coverings of highways]. *Privolzhskij nauchnyj vestnik*. 2016; 1: 48–53 (in Russian).

16. Uglova E. V., Besschetnov B. V. Dlitel'naja treshhinostojkost' asfal'tobetona dorozhnyh pokrytij [Long-term cracking resistance of asphaltic concrete pavement]. *Vestnik VolGASU*. 2011; 23 (42): 103–109 (in Russian).

17. Sokolov Ju.V. etc. Issledovanie struktury i svoystv koncentrirovannyh bitumnyh mastik na osnove bitumov i tehnikeskogo ugleroda [Research of the structure and properties of concentrated bitumen mastics based on bitumen and carbon black]. *Stroitel'nye materialy*. 2005; 5: 10–11 (in Russian).

18. Baklanova O.N. etc. Vliyanie parametrov mehanicheskoy aktivacii na izmenenie razmerov

agregatov, tekstury i funkcional'nogo sostava poverhnosti tehnikeskogo ugleroda [Influence of parameters of mechanical activation on the change in the size of units, texture and functional composition of the carbon black surface]. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2017; 12(90): 1654–1662 (in Russian).

Поступила 27.02.2019, принята к публикации 27.08.2019.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляев Константин Владимирович (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ», ORCID: 0000-0002-9443-0903 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: bkv775@mail.ru).

Чулкова Ирина Львовна (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, директор «Инженерно-строительного института» ФГБОУ ВО «СибАДИ», ORCID: 0000-0003-4451-2297 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: le5@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Belyaev – Candidate of Technical Sciences, Department of the Operation and Service of Transport and Technological Machines and Systems in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID: 0000-0002-9443-0903 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: bkv775@mail.ru).

Irina L. Chulkova – Doctor of Technical Sciences, Director of the Engineering and Construction Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID: 0000-0003-4451-2297 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: le5@inbox.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Беляев К.В. Провёл анализ литературных источников. Участвовал в проведении экспериментов и анализе результатов. Проведена работа по оформлению текстового материала. Оформлял сопроводительную документацию.

Чулкова И.Л. Проведён анализ литературных источников. Участие в анализе результатов. Проверка и корректировка статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Konstantin V. Belyaev – analysis of literary sources; experimental and results' analysis;

design of the material; preparing of the accompanying documentation.

Irina L. Chulkova – analysis of literary sources; participation in the results' analysis; correction of the paper.

УДК 693.557

ВЫБОР МЕТОДА СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев
НИУ МГСУ,
г. Москва, Россия
ivan50@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена вопросам использования различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона в зависимости от граничных условий, заданных в процессе проектирования и возведения объекта. К ним относятся температурный режим выдерживания бетона, скорость оборачиваемости опалубки и, как следствие, сроки строительства объекта, а также иные факторы. Целью работы является обобщение различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона, направленных на обеспечение требуемых сроков оборачиваемости опалубки и технологического оборудования, с учётом обеспечения потребительских свойств конструкций. Научная новизна работы заключается в актуализации и апробации методов регулирования разогрева твердеющего бетона, обеспечивающих формирование требуемых потребительских свойств конструкций, ранее не применяемых в транспортном и гражданском строительстве, основанных на предварительном моделировании теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне, посредством расчётного программного комплекса. Авторами на примере строительства нескольких крупных объектов рассмотрены наиболее часто возникающие ситуации, связанные с подбором технологии строительства в сложных природных условиях с учётом обеспечения требуемых потребительских свойств – бетонирование крупномассивных конструкций в ограниченные сроки в тёплый период года и маломассивных конструкций в условиях зимнего бетонирования. Данный вопрос представляется актуальным ввиду масштабного строительства в нашей стране большого числа внеклассовых, а также реконструкции ранее возведённых объектов.

Материалы и методы. Исследования проводились с учётом реальных климатических условий при использовании современных расчётно-измерительных и аналитических систем, учитывающих изменение термонапряжённого состояния твердеющего бетона в зависимости от изменения температуры бетонной смеси во времени. Применение современного расчётно-аналитического комплекса при физическом моделировании теплофизических процессов твердеющего бетона позволило получить результаты максимально точно сопоставимые с данными наблюдений, полученными в процессе строительства.

Результаты. Полученные результаты позволили разработать проекты производства работ по бетонированию объектов, возводимых в различных заданных условиях, с соблюдением требуемых сроков оборачиваемости опалубки и обеспечением необходимых потребительских свойств.

Обсуждение и заключение. На основании исследований с учетом основных положений теории собственного термонапряжённого состояния бетона были предложены мероприятия, реализация которых позволила возвести сложные строительные объекты в сжатые сроки в особых климатических условиях. Статья будет полезна инженерно-техническому персоналу, ведущему свою деятельность в реальных условиях строительства, и специалистам, занятым вопросами изучения теплофизических процессов твердеющего бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, экзотермия, тепловыделение, моделирование, расчет, температура, прочность, опалубка, термонапряжённое состояние, водотрубное охлаждение, электропрогрев.

© И.С. Пуляев, С.М. Пуляев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

HARDENING CONCRETE IN STRUCTURES: CHOICE OF THE CONSTRUCTION METHOD BASED ON RESULTS OF THE TEMPERATURE REGIME MODELING IN SPECIAL CONDITIONS

I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev

National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia
ivan50@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the use of different methods of the hardening concrete's temperature regime, depending on the boundary conditions specified in the design and construction of the object. Such conditions include the temperature regime of concrete holding, the turnover rate of the formwork and the construction time of the facility, as well as other factors. The aim of the research is a compilation of the various methods of investigation of the temperature regime of hardening concrete, aimed at providing the required timing of the formwork and technological equipment turnover to ensuring the consumer properties of the structures. The scientific novelty of the research lies in the updating and testing of methods for regulating the hardening concrete's heating, ensuring the formation of the required consumer structures' properties not previously used in transport and civil construction and based on preliminary modeling of thermal processes occurring in the hardening concrete through the calculation software. The authors on the example of several large objects' construction consider the most common situations associated with the selection of construction technology in difficult natural conditions by taking into account the required consumer properties: concreting of large-mass structures in a limited time in the warm season and low-mass structures in winter concreting. The research is relevant in view of the large-scale construction in our country as well as of the facilities' reconstruction.

Materials and methods. The authors carried out the research with the use of modern settlement-measuring and analytical systems taking into account the change in the thermal stress state of hardening concrete as a function of the temperature change of the concrete mix over time. The use of the modern computational and analytical complex in the physical modeling of the thermo physical processes of hardening concrete made it possible to obtain results as accurately as possible and comparable with observational data obtained during the construction process.

Results. The results allowed authors to project the objects' concreting of erected in various predetermined conditions while observing the required terms of formwork turnover and ensuring the necessary consumer properties.

Discussion and conclusions. The authors propose measures, the implementation of which makes it possible to build complex construction projects in a short time in special climatic conditions. The paper is useful for engineering and technical personnel and for professionals involved in the study of thermal processes of hardening concrete.

KEYWORDS: concrete, exothermic, heat generation, modeling, calculation, temperature, strength, formwork, thermally stressed state, water-tube cooling, electrical heating.

© I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev



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

ВВЕДЕНИЕ

Широко известно, что физическое моделирование процесса твердения бетона, связанное в том числе с процессами его тепловыделения и сроками набора прочности, позволяет во многом оптимизировать технологию строительного производства, предупредить нежелательные дефекты и трещины, вызванные неучтённым критическим перепадом температур, а также повысить экономическую целесообразность проведения работ, связанную в первую очередь с прогнозной оборачиваемостью опалубки и снижением затрат на проведение ремонтных работ в случае возникновения необходимости их проведения [1, 2, 3].

Однако при этом недостаточно принимать во внимание только тот опыт и те знания, которые связаны исключительно с различными технологиями организации строительного производства и использование которых в повседневной практике применимо для унифицированных классовых объектов [4, 5]. Зачастую при строительстве сложных и уникальных конструкций, имеющих большую архитектурную выразительность, массивность, сложную конфигурацию и повышенную ответственность, реконструкции и реставрации ранее построенных и «законсервированных» объектов, кроме описанных выше факторов, необходимо принимать во внимание и те, которые напрямую касаются внутренней структуры бетона как строительного материала и оценивают его состояние во времени на протяжении всего технологического процесса производства – от момента приготовления бетонной смеси до снятия опалубки со всей конструкции и ввода ее в эксплуатацию. Практика, обзор имеющейся научно-технической литературы и существующий опыт показывают, что недоучёт этих факторов часто приводит к увеличению сроков возведения, снижению экономической целесообразности и, как следствие, удорожанию строительства всего объекта, а также к неоправданным затратам на проведение ремонтно-восстановительных работ в случае обнаружения дефектов и трещин [6, 7, 8, 9, 10].

Цель настоящей работы заключается в обобщении накопленного опыта использования различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона, которые направлены на соблюдение необходимых сроков оборачиваемости опалубки и технологического оборудования в условиях обеспечения качества возводимых конструкций при круглогодичном строительстве, а апробация данных методов, ранее не применяемых в

транспортном и гражданском строительстве, позволяет говорить о взаимной возможности их применения для различных типов объектов без привязки к конкретной классификации. В статье показано, что при использовании определенных технологических приёмов в сочетании с основными положениями теории собственного термонапряженного состояния бетона можно обеспечить требуемые потребительские свойства всей конструкции с учётом заданных начальных граничных условий и заданной технологией строительства, соблюдения определенного темпа строительства объекта, используя в качестве подосновы рассматриваемого процесса применение физического моделирования технологических процессов, происходящих в твердеющем бетоне во времени.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование температурного режима твердеющего бетона в условиях искусственного охлаждения посредством применения воды с учётом сложных начальных граничных условий и с применением апробированных аналитических методов математического анализа вызывает определенные трудности, а в некоторых случаях представляется невозможным [11]. Особо остро данный вопрос стоит в транспортном строительстве, где наиболее часто встречаются крупномассивные объекты, возведение которых проводится в сложных климатических условиях, в стесненной местности и в сжатые сроки [12, 13, 14]. Однако выбранная технология строительства моста через р. Оку в г. Муроме с использованием переставной опалубки могла оказаться оправданной и эффективной только в случае трубного охлаждения нижних ярусов верхних частей пилонов водой. Смоделировать проект трубного охлаждения твердеющего бетона водой можно было только на основании установления результатов исследования теплообмена протекающей в трубах воды с окружающим твердеющим бетоном.

В гидротехнике в своё время аналогичные задачи были решены с помощью приближённых методов расчёта, которые, однако, давали существенные погрешности [15]. К тому же при возведении массивных гидротехнических плотин используются по большей мере низкокласовые бетоны с пониженным тепловыделением, а бетоны классов В30 ... В45 и выше – наиболее распространенные в транспортном строительстве – вообще не применяются. Как следствие, применение номограмм, раз-

работанных в своё время для охлаждения водой бетонов марок М150 и М200, при использовании в современных реальных условиях транспортного строительства бетонов классов В30...В45 оказалось попросту невозможным. Решить математические трудности в определенной мере помогло применение метода непосредственного моделирования технологических процессов охлаждения бетона водой с использованием теории подобия, частично базирующемся на методе гидравлических аналогий, разработанном проф. В.С. Лукьяновым и усовершенствованным проф. А.Р. Соловьянчиком.¹ Этот метод в 50-е годы прошлого века был успешно использован для расчётов трубного охлаждения твердеющего бетона плотин гидроэлектростанций, показал достаточно высокую эффективность и обоснованность [16, 17, 18].

На сегодняшний день метод гидравлических аналогий практически не используется, но на его основе разработана расчётная программа для ПК, которая с достаточно высокой точностью позволяет решать задачи теплофизики твердеющего бетона в одномерной, двухмерной и трёхмерной постановках с заданными граничными условиями. В данной работе использовался программный комплекс «ЗА 200» («ЗетА 200»), которая была разработана А.Р. Соловьянчиком, В.П. Величко и В.А. Зориной [19, 20], многократно апробирована и проверена на практике [21, 22]. В основу данного программного комплекса положен алгоритм численного решения краевых задач, предложенный В.П. Величко [23], гибкость которого достигнута за счёт применения специальных технологических приёмов, являющихся дальнейшим развитием метода гидравлических аналогий, разработанного ранее в ЦНИИС Минтрансстроя проф. В.С. Лукьяновым. Однако при постановке задачи для планируемого охлаждения твердеющего бетона транспортного объекта протекающей в трубах водой авторам статьи потребовалось довести определенные изменения и дополнения в программу для ПК с целью ее усовершенствования и автоматизации и в первую очередь в указание исходной информации, в выбор и обоснование начальных и граничных условий [24], которые максимально приближены к реальным и учитывают изменения во времени, проис-

ходящие с твердеющим бетоном в зависимости от температуры наружного воздуха, окружающей среды и температуры его укладки в опалубку.

Известно, что при строительстве гидротехнических сооружений трубы искусственного охлаждения в бетонном массиве укладываются горизонтальными рядами змеевиков. При строительстве рассматриваемого моста подобный метод оказался малоэффективным, и в этой связи было принято решение о вертикальном расположении труб коридорным или шахматным порядком. При этом рассматриваемый бетонный массив разделялся на конечные микроэлементы, каждый из которых состоял из условно принятого бетонного блока в виде прямоугольной или шестигранной призмы с проходящей в центре трубой охлаждения. Схематическое иллюстрирование бетонного массива с заложенной в ней системой водяного охлаждения труб представлено на рисунке 1. Для пилона рассматриваемого моста авторами была принята коридорная схема расположения труб ввиду густоармированности возводимой конструкции и, как следствие, указанное расположение труб оказалось наиболее целесообразным и оправданным в дальнейшем при ведении работ.

Из теории подобия следует, что теплофизический расчет температурного режима твердеющего бетона в прямоугольном поле при применении искусственного охлаждения водой может быть проведен путем решения поставленной задачи для некоего цилиндра с радиусом R_n , где R_n – радиус рассматриваемого цилиндра, преобразованного из фигуры прямоугольной призмы. Радиус рассматриваемого цилиндра определяется из условия равенства площадей поперечного сечения призмы и цилиндра.

При расположении труб коридорным порядком

$$R = \frac{\sqrt{BH}}{\pi},$$

где B и H – заданное расстояние между установленными трубами в блоке в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

¹ Лукьянов В.С., Соловьянчик А.Р. Исследование тепловыделения цемента в термосном калориметре ЦНИИСа. Сборник докладов «Методы экспериментального определения и расчёта тепловыделения в бетоне». М. : ВНИИПИ Теплопроект, 1971. С. 45–58.

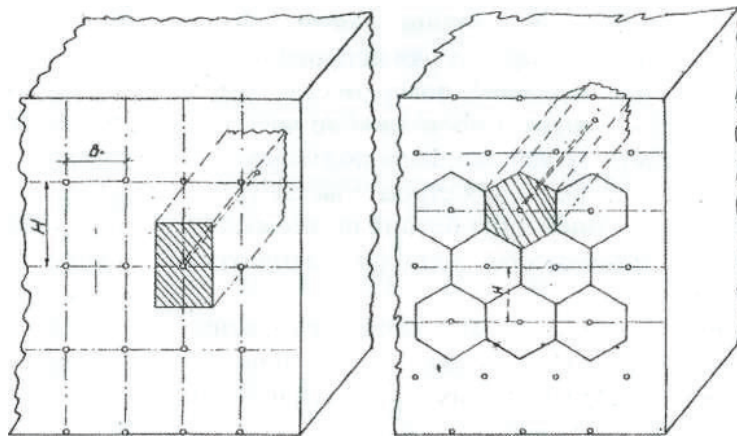


Рисунок 1 – Схема расположения труб коридорным и шахматным порядком

Figure 1 – Scheme of tubes in line and staggered order

Учёт изменения температурного режима и протекающих процессов в цилиндре может быть условно разделен на две задачи: определение теплопередачи в плоскости поперечного сечения цилиндра и определение температурного процесса по длине рассматриваемой трубы.

Полагая, что теплообмен в бетоне вдоль трубы практически отсутствует, а изменение температуры охладителя в данном сечении происходит достаточно медленно ввиду заданной скорости ее подачи, допустимо считать, что закономерность распределения температуры в плоскости поперечного сечения и среднее ее значение для первой плоской задачи может быть выражена через начальную температуру бетона до охлаждения, температуру охладителя (воды) и адиабатический подъем температуры бетона от экзотермии цемента.

При возведении рассматриваемого объекта в расчётах рассматривалась плоская задача по охлаждению цилиндра с заданным радиусом R . На первом этапе было принято, что радиус $R = 0,56$ м (при расстоянии между трубами равным примерно 1 м). При этом в процессе решения задачи был принят ряд допущений, среди которых в частности:

- значение температуры поверхности труб принималось равным значению температуры охладителя в трубе и было постоянным во времени. Такое положение вещей является правомерным, так как оно нашло подтверждение ранее при охлаждении бетона водой при возведении гидроэлектростанций;
- значение начальной температуры бетона по всему сечению было одинаковым, и верхняя поверхность расчетного цилиндра находилась в адиабатических условиях.

При учёте указанных выше параметров дифференциальное уравнение и краевые условия, характеризующие процесс изменения температуры в расчётном цилиндре, будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \mathcal{E}_c - B.$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0 \quad \text{для } r_0 \leq r \leq R \quad T &= t_b; \\ \tau > 0 \quad r < r_0 \quad T &= t_s; \\ r = R \quad \frac{\partial T}{\partial r} &= 0, \end{aligned}$$

где r – расстояние от центра цилиндра, м;
 r_0 – радиус установленной трубы, м;
 R – радиус расчётного цилиндра, м;
 T – искомая температура в определенной точке, °C;
 t_s – температура охладителя (воды), °C;
 t_b – начальная температура уложенного бетона, °C.

При проведении расчетов за центры элементарных слоев были приняты их центры тяжести, определение которых было осуществлено по формуле

$$r_{ц, n} = r_{n-1} + \xi,$$

где $\xi = l \cdot \frac{3r_{n-1} + 2l}{6r_{n-1} + 3l}$ – расстояние центра тяжести расчетного слоя от его внутренней поверхности, м.

$$l = r_n - r_{n-1},$$

где r_n – радиус наружной поверхности слоя, м;
 r_{n-1} – радиус внутренней поверхности слоя, м.

Термическое сопротивление R между смежными слоями определялось по формуле

$$R = \frac{1}{\lambda} \times \frac{r_{u(n)}}{n \cdot r_{u(n-1)}} \quad \text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт},$$

где λ – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°C);

$r_{u(n)}, r_{u(n-1)}$ – радиусы поверхностей, проходящих через центр тяжести произвольного n -го слоя и смежного слоя $n-1$, м.

При указанной разбивке температурного поля теплоемкость элементарных слоев сосредоточена в цилиндрических поверхностях, проходящих через центры тяжести этих слоев, величина которой определяется по формуле

$$C_n = C_6 \gamma_6 \cdot \frac{r_n^2 - r_{n-1}^2}{2},$$

где C_6 – удельная теплоемкость бетона;

γ_6 – средняя плотность бетона, кг/м³;

r_n – радиус наружной поверхности слоя n , м;

r_{n-1} – радиус внутренней поверхности слоя n , м.

Теперь рассмотрим пример моделирования технологических процессов, происходящих в твердеющим бетоне, связанный с выдерживанием бетона в определенных климатических условиях, например при зимнем бетонировании. Данная проблематика широко освещена в различных источниках [25, 26], в том числе в трудах Б.М. Красновского [27], однако технология возведения конструкций из монолитного железобетона с учётом расконсервации объекта, при которой бетон «прибетонируется» к ранее возведенной конструкции с учётом обеспечения заданных темпов строительства освещена недостаточно. Такая технология в частности применялась при возведении академии дзюдо в подмосковном Звенигороде, где в условиях ускоренных темпов строительства объекта было принято решение применять при производстве работ в зимних условиях прогрев бетона для конструкций стен и перегородок с помощью тепловых генераторов, а для перекрытий – с применением комбинированного способа, включающего обеспечение требуемого температурного режима воздушной среды в помещении под перекрытием с помощью тепловых генераторов и электропрогрев

бетона перекрытия с помощью греющих проводов при наличии тепловой изоляции с термическим сопротивлением $R=1,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ на верхней поверхности перекрытия.

При прогреве бетона с помощью тепловых генераторов работы выполнялись в следующей последовательности:

- устраивались тепляки;
- отогревался бетон перекрытия и примыкающие к бетонируемому участку ранее забетонированные конструкции, опалубка и арматура до температуры не ниже +5 °C;
- укладывалась бетонная смесь;
- производился прогрев бетона в технологическом укрытии при температуре окружающей среды +35 ... +40 °C с передачей нагретого воздуха в течение времени, необходимого для набора бетоном прочности не менее 70% от R28;
- прекращался прогрев бетона, после чего он выдерживался в течение времени, необходимого для обеспечения перепада температур между наружной поверхностью бетона и окружающей средой не более 10 °C;
- после достижения требуемого перепада температур разбирались тепляки и снималось утепление и опалубка.

При использовании другого вида прогрева с применением греющих проводов был установлен следующий порядок работ:

- устанавливалась опалубка;
- устанавливалась арматура в случае её отсутствия;
- устанавливались прокладки-фиксаторы, обеспечивающие требуемую толщину защитного слоя;
- укладывались греющие провода вдоль арматуры. Во избежание обгорания тепловой изоляции, замыкания на массу и перегорания токопроводящих жил в контакте с арматурой защитного слоя на оконцовки нагревательного провода надевались трубки из термоусадочного полиэтилена или создавались отводы из бетона монтажным проводом расчётного сечения. Отвод производился при использовании нагревательных проводов в полиэтиленовой изоляции при погонной нагрузке, превышающей 25 Вт/м;
- устанавливались коммутирующие провода;
- устанавливалась и испытывалась на холостом ходу трансформаторная подстанция;
- поверхность, на которую укладывался бетон, продувкой воздуха от компрессора очищалась от снега и мусора;

- устанавливался электрокалорифер с гибким шлангом для обогрева основания, опалубки и арматуры;
- устанавливались трубы для контроля температуры;
- над бетонируемой поверхностью устанавливался полог (колпак);
- опалубка, арматура и прилегающие поверхности стен и перекрытий обогревались до температуры не ниже $+5^{\circ}\text{C}$ электрокалорифером с гибким шлангом;
- бетонировались конструктивные элементы перекрытия. При этом размер захватки определялся исходя из объёмов поступающего бетона и имеющихся электрических мощностей и целесообразных размеров блоков бетонирования (продолжительность бетонирования не превышала 1,5 ... 2 ч);
- укладывалось влаготеплозащитное укрытие с требуемым термическим сопротивлением тепловой изоляции;
- пробником проверялась работоспособность каждого нагревательного элемента;
- начинался подъём температуры с установленной скоростью.

Отдельно стоит отметить тот фактор, что зачастую при строительстве крупных промышленных и гражданских объектов требуется оперативное применение различных методов, связанных с использованием современных технологических приёмов, направленных на обеспечение заданных свойств железобетонных конструкций исходя из условий строительства того или иного объекта [28, 29]. Таким примером может служить разработка авторами мероприятий по тепловой обработке и выдерживанию бетона при изготовлении балок из самоуплотняющейся бетонной смеси в г. Ростове-на-Дону при различных климатических условиях без дополнительного обогрева и с обогревом в холодный период года, рекомендациями по управлению прогревом бетона, созданию системы автоматического управления и контролю качества работ. Указанная работа была проведена исходя из условия, что бетонные работы проводились в полигонных условиях и путем моделирования технологических процессов при применении беспрогревного выдерживания бетона в теплый период года и разработки режимов электропрогрева бетона и был обеспечен требуемый темп выпуска балок при рациональном использовании электроэнергии.

Применение описанных выше мероприятий без проведения физического моделирования процессов, происходящих в твердеющем

бетоне, было бы неполным, а зачастую невозможным. И, к сожалению, при проектировании и строительстве большого числа объектов, возводимых в настоящее время в нашей стране, этот фактор остаётся не всегда учтённым. А опыт показывает [30, 31, 32, 33], что для правильной оценки процессов, происходящих в твердеющем бетоне, её необходимо производить посредством применения современных расчётно-аналитических комплексов, позволяющих в реальном времени отследить процессы, происходящие в твердеющем бетоне. При написании данной работы указанные факторы были учтены авторами в полном объёме, и результаты, полученные при этом, представлены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для изучения температурного процесса в охлаждаемом цилиндре при расчёте водотрубного охлаждения были проведены несколько серий расчетов. При этом были заданы следующие технологические параметры:

- температура бетона (начальная) – 10°C ... 20°C ;
- температура воды (охлаждаемой) – 5°C ... 20°C ;
- радиусы R цилиндров (расчётных) – 0,56 ... 0,8 м;
- радиус трубы $r_o = 12,5$ мм (с последующим изменением на $r_o = 20$ мм).

Теплофизические характеристики бетона: теплопроводность $\lambda = 2,1$ Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$; теплоемкость $C_6 = 0,96$ кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$; средняя плотность $\gamma_6 = 2600$ кг/м 3 .

Расход цемента – 400 кг/м 3 .

Схема охлаждения водой твердеющего бетона, принятая при проведении расчётов, при расстоянии между трубами 1 м приведена на рисунке 2.

В процессе работы авторами проведено несколько серий теплофизических расчётов, в которых изменялась скорость движения воды в трубах и расстояние между ними. Расчёты показали, что при скорости воды в трубах 0,6 м/с в летний период года требуемые сроки оборачиваемости опалубки не обеспечиваются и только при температуре бетонной смеси 15°C , при скорости движения воды 1 м/с и температуре охлаждающей жидкости 20°C , разогреваемый от экзотермии цемента бетон охлаждается до $+40^{\circ}\text{C}$, при которой допускается распалубливание конструкции за 10 ... 12 суток, то есть то время, обеспечивающее требуемые сроки строительства объекта.

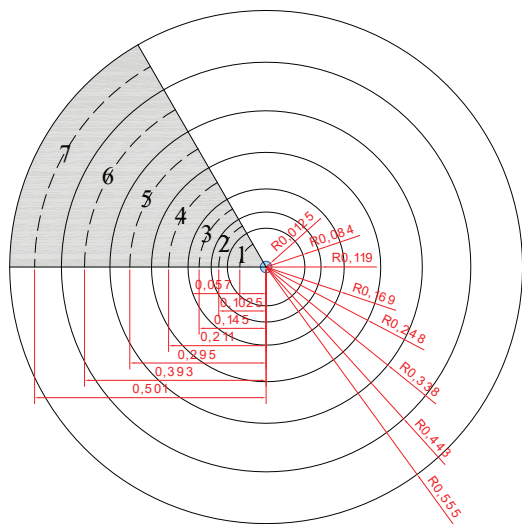


Рисунок 2 – Расчётная схема охлаждения твердеющего бетона вокруг трубы при расстоянии между трубами 1 м при диаметре труб 25 мм

Figure 2 – Design scheme for cooling the hardening concrete around the pipe at the 1 m distance between the pipes of 25 mm diameter

Исследования показали, что расстояния между трубами должны назначаться с учётом массивности конструктивных элементов. Таким образом, для более массивных частей пилонов расстояние между трубами составило 1 м, а для менее массивных – 1,2 м.

Для определения сроков выдерживания бетона в тепляках при использовании тепловых генераторов и с применением греющих проводов были произведены теплофизические расчёты твердеющего бетона с помощью программного комплекса «ЗА 200», однако в данном случае авторам также потребовалось внести корректировки в работу программного комплекса, направленные на получение достоверных расчётов по тепловому взаимодействию между элементарными блоками системы исходя из установки по арматурному контуру греющего провода.

Например, при расчёте парапета сечением 300х1000 мм (рисунок 3) конструктивный элемент разбивался на элементарные блоки, после чего в программе рассматривалось тепловое взаимодействие между этими блоками и окружающей средой. В результате расчётов

были построены графики изменения температур и прочности твердеющего бетона, один из которых приведён на рисунке 4. По указанным графикам легко определить время выдерживания бетона для достижения им необходимой прочности.

До начала производства работ также были произведены теплофизические расчёты температурного режима твердеющего бетона для условий прогрева с применением греющих проводов, позволяющих определить как максимальную температуру прогрева бетона, так и сроки его выдерживания до набора требуемой прочности.

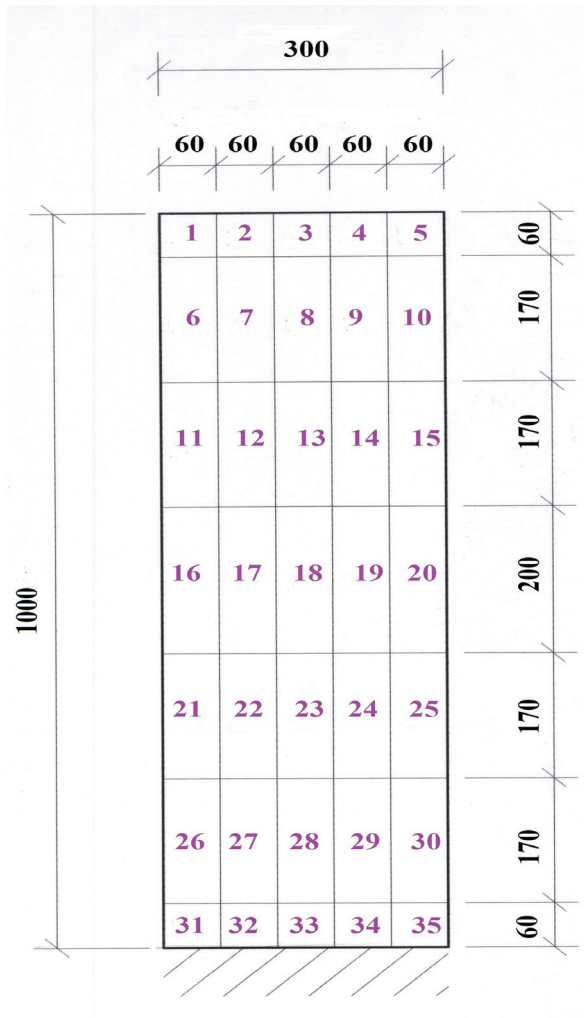


Рисунок 3 – Расчётная схема парапета сечением 300х1000 мм

Figure 3 – Design scheme of the 300x1000 mm section parapet

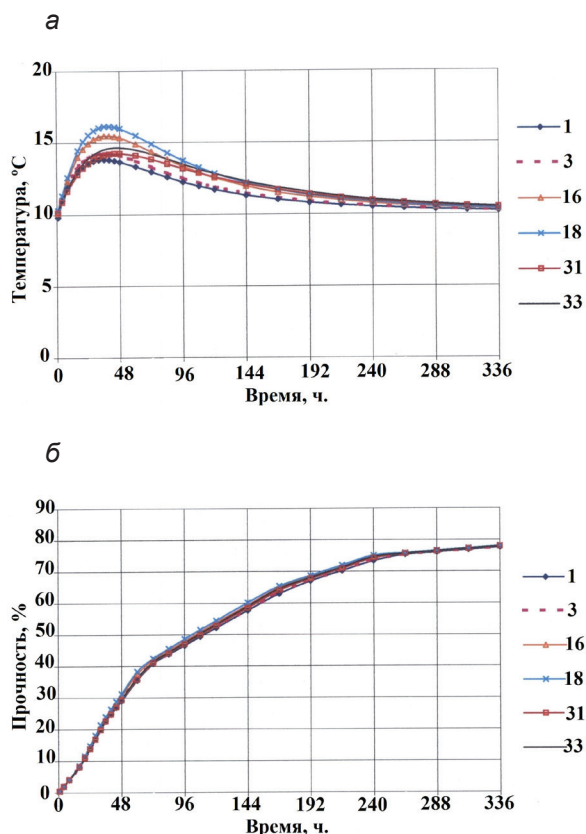


Рисунок 4 – Графики изменения температуры (а) и прочности (б) твердеющего бетона парапета при $t_{б.см.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=10^{\circ}\text{C}$

Figure 4 – Graphs of temperature (a) and strength (b) of the hardening concrete parapet

При этом на этапе подготовки расчётных моделей в программный комплекс «ЗА 200» авторами были внесены некоторые коррективы физического моделирования, связанные с заданием начальных граничных условий. Так, начальная температура бетонной смеси, уложенной в конструкцию, принималась из расчёта

$$t_{б.н.} = t_{б.см.} - (t_{б.см.} - t_{н.в.})0,01\tau_{тр},$$

где $t_{б.н.}$ – начальная температура бетонной смеси, уложенной в конструкцию, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{б.см.}$ – температура бетонной смеси, отпускаемой с бетоносмесительного узла, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Были отдельно разработаны расчётные модели прогрева как непосредственно плиты перекрытия, так и плиты перекрытия с ригелем. Модель последнего элемента приведена на рисунке 5, а один из результатов расчётов – на рисунке 6.

При использовании греющих проводов особое внимание было уделено контролю температурного режима твердеющего бетона. По расчётам скорость остывания бетонных конструкций с модулем поверхности $5 \dots 10 \text{ м}^2$ была обеспечена в диапазоне не более 5°C в ч.

Исходя из того, что работы по бетонированию конструктивных элементов здания академии дзюдо проводились в холодный период года, основание, на которое укладывался бетон, потребовалось отогреть до температуры

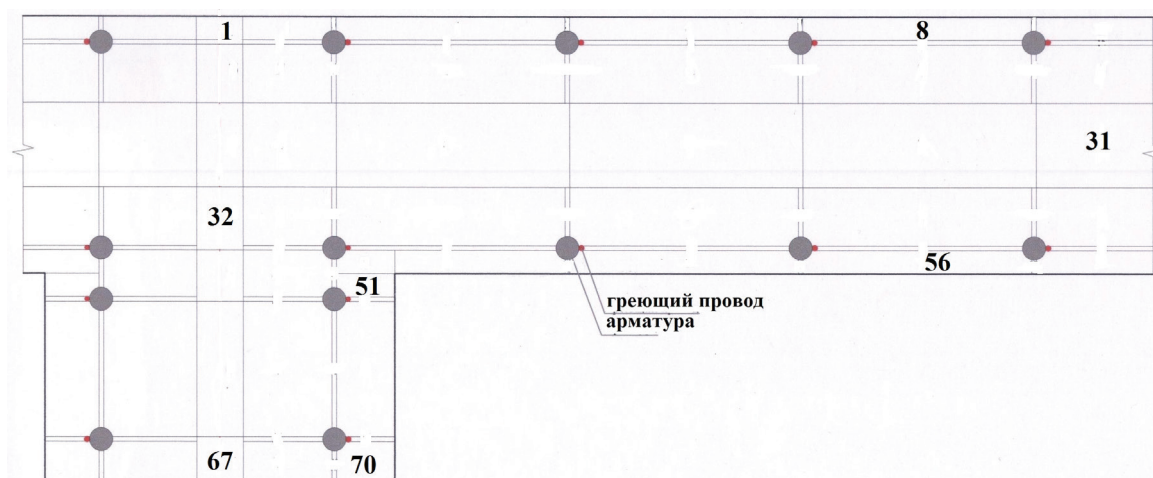


Рисунок 5 – Расчётная схема плиты перекрытия с ригелем при бетонировании с электропрогревом с шагом проводов 200 мм

Figure 5 – Calculation scheme of the floor bolt plate's concreting with 200 mm electrical warming

+ 5 °С, при том что скорость подъема температуры бетона основания при отоплении не превышала 3 °С в ч. Продолжительность отопления основания из бетона, на которое укладывалась бетонная смесь, или конструкций из затвердевшего бетона, к которым прибетонировалась новая конструкция, зависела от фактической температуры основания, его массивности, условий подвода тепловой энергии и температуры греющей среды.

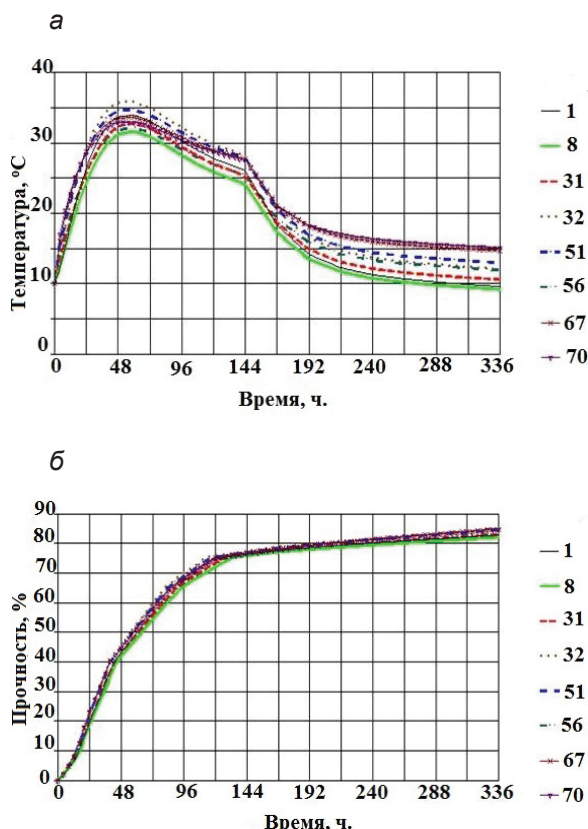


Рисунок 6 – Графики изменения температуры (а) и прочности (б) твердеющего бетона ригеля при $t_{б.см.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=-20^{\circ}\text{C}$, $t_{в.укр.}=20^{\circ}\text{C}$, $t_{гр.пр.}=80^{\circ}\text{C}$

Figure 6 – Graphs of temperature change (а) and strength (б) of hardening concrete crossbar

Особое внимание при бетонировании конструктивных элементов перекрытий, колонн и ригелей было уделено выдерживанию бетона. Оказалось, что при выдерживании бетона перекрытий и ригелей уложенный бетон в теплый период года должен быть укрыт теплоизоляционным покрытием с термическим сопротивлением $R = 0,30 \dots 0,50 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (слой влагозащитной пленки, слой дорнита толщиной 3 ... 5 мм, слой влагозащитной пленки). При выдерживании бетона перекрытий в холодный период года теплый воздух подводился к ниж-

ней поверхности перекрытия, создавая определенный температурный режим в помещении под перекрытием, и осуществлялся прогрев бетона перекрытия греющими проводами с нижней и верхней поверхности перекрытий. Следует обратить внимание, что при наличии ригелей греющие провода устанавливались с таким расчётом, чтобы обеспечить одинаковые условия для прогрева разномассивных частей конструктивных элементов. При этом термическое сопротивление тепловой изоляции над перекрытием при прогреве греющими проводами составляло сверху $1,15 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а под перекрытием снизу $R=0,23 \dots 0,50 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Такое решение было принято с целью уменьшения затрат на тепловую изоляцию и снижения трудоёмкости работ. При выдерживании бетона ригелей и перекрытий под ними поддерживалась температура воздуха не менее $10 \dots 20^{\circ}\text{C}$.

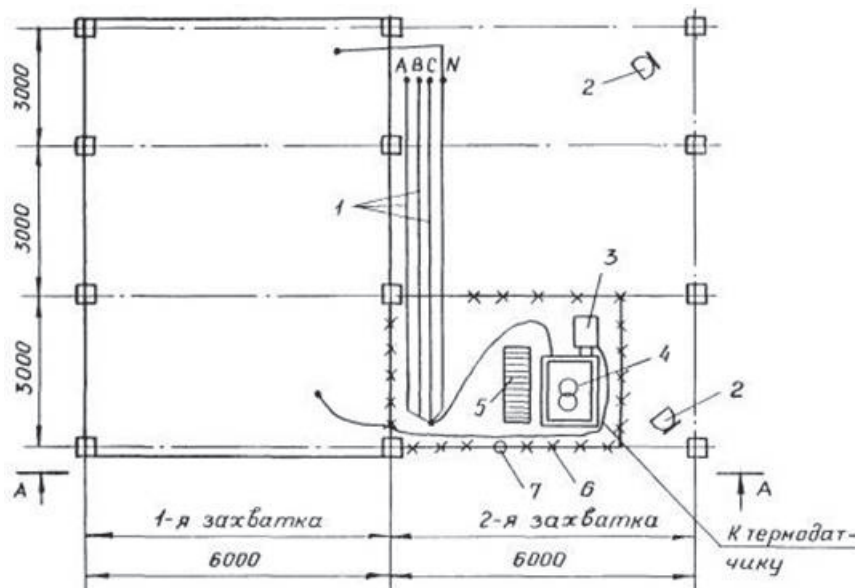
При бетонировании перекрытия греющие провода устанавливались по арматуре соразмерно толщине защитного слоя бетона с верхней и с нижней поверхностей перекрытий конструкции. Общий вид расположения греющих проводов показан на рисунке 7. Примерная схема электрообогрева перекрытия Академии дзюдо греющими проводами приведена на рисунке 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований были разработаны технологические регламенты на производство подготовительных, опалубочных, арматурных и бетонных работ, а также технические задания на устройство трубного охлаждения твердеющего бетона пилонов водой, по которому были разработаны рабочие чертежи, устройство и подключение греющих проводов в бетоне в период зимнего бетонирования.

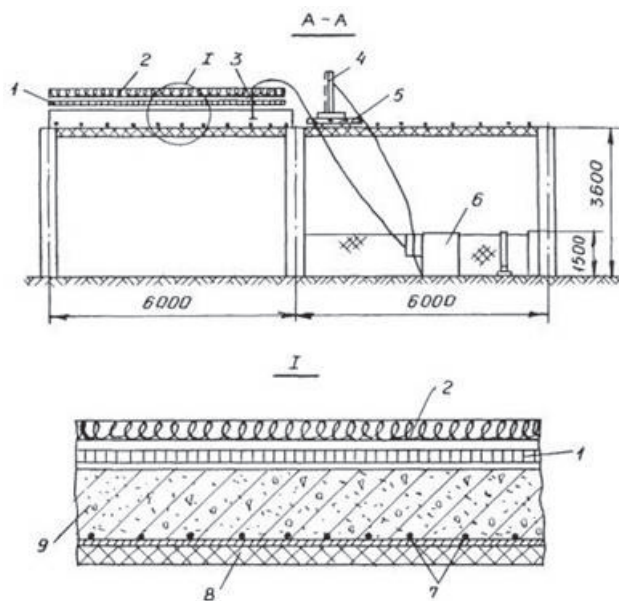
Для охлаждения воды было принято решение использовать стальные трубы с внутренним диаметром $d_{вн} = 40 \text{ мм}$, которые устанавливались вертикально. При охлаждении нижних ярусов верхних частей пилонов трубы устанавливались на расстоянии не более 1 м друг от друга. При охлаждении нижних – менее массивных ярусов верхних частей пилонов – трубы устанавливались на расстоянии 1 ... 1,2 м друг от друга. В частности, схема расположения труб охлаждения на одной из захваток пилоната представлена на рисунке 9. Вода в трубы подавалась из реки с помощью насоса через регистры и удалялась из труб через регистры. Трубы между собой соединя-

а



- 1 – инвентарная трехфазная секция шинопроводов; 2 – прожектор; 3 – блок-приставка АРТ-2;
4 – трансформаторная подстанция КТП-63-06; 5 – диэлектрический коврик;
6 – инвентарное ограждение; 7 – сигнальная лампочка красного цвета

б



- 1 – греющие плоские элементы (ГЭП); 2 – теплоизоляционное гибкое покрытие (ТИГП);
3 – термодатчик; 4 – блок-приставка АРТ-2; 5 – деревянные переносные щиты;
6 – трансформаторная подстанция НТП-63-06; 7 – нагревательные провода;
8 – утепленная опалубка; 9 – бетон плиты

Рисунок 7 – Примерная схема электрообогрева перекрытия:
а – общий вид, б – в разрезе А-А

Figure 7 – Approximate scheme of electrical heating floor:
а – general view, б – in A-A section

лись снизу попарно с устройством закруглений во избежание образования острых углов. Горизонтально расположенные внизу яруса трубы находились на расстоянии не более 0,3 ... 0,5 м от поверхности ранее забетонированного яруса. Трубы надежно закреплялись для исключения их сдвижки в процессе укладки бетонной смеси. При этом стоит отметить, что принципиальных отличий в порядке бетонирования конструкции с использованием водотрубного охлаждения от обычного ведения бетонных работ, а также дополнительных требований, кроме описанных выше, не предусмотрено. Слив воды из регистров обратно в реку был устроен таким образом, чтобы вода при удалении из системы охлаждения не попала на ранее забетонированные ярусы верхних частей пилонов и нижнюю часть пилона.

Отдельно стоит сказать о требованиях к насосам для подачи воды. Мощность насоса для системы водяного охлаждения подбиралась с учетом общего расхода воды при возведении захватки с максимальным объемом укладываемого бетона. Скорость движения воды по трубам при работе системы охлаждения составляла 0,6 ... 0,9 м/с. Объем подаваемой воды для каждой захватки определялся с учетом общего сечения вертикально установленных труб на захватке и принятой минимальной скорости движения воды в трубах. Насосы при этом обеспечивали возможность их непрерывной работы в течение 15 сут (с возможными перерывами в работе согласно требованиям технологического регламента на производство бетонных работ).



*Рисунок 8 – Процесс установки греющих проводов
при подготовке перекрытия здания академии дзюдо к бетонированию*

Figure 8 – Process of the heating wires' installing in the preparation of the Academy of Judo building for concreting

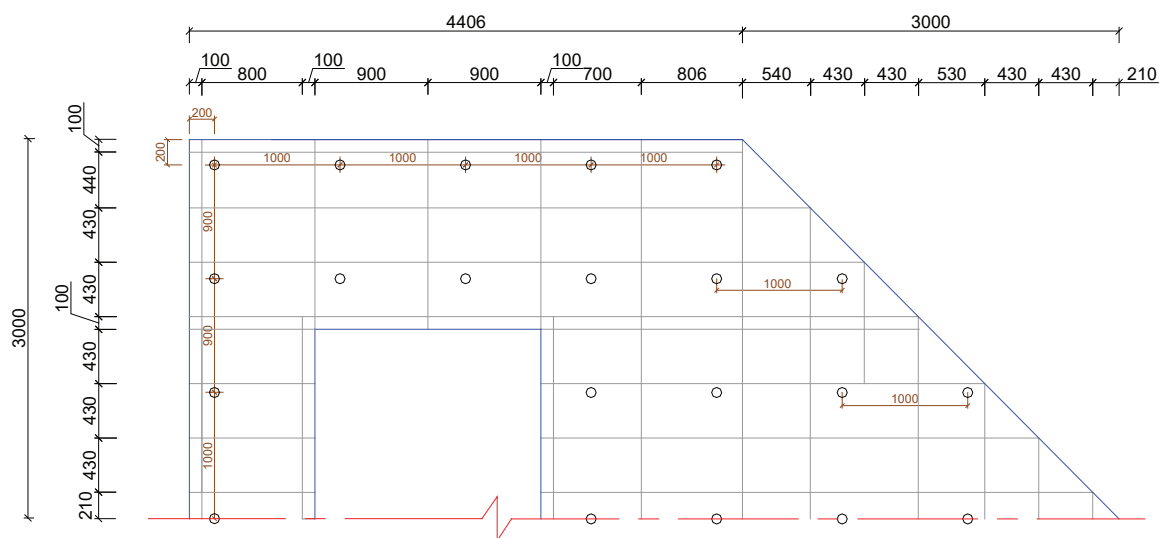


Рисунок 9 – Эскизная схема установки труб водяного охлаждения нижних ярусов верхних частей пилона

Figure 9 – Schematic diagram of the water cooling pipes' installation of the lower tiers of the upper pylon parts

Проект был реализован в частности при строительстве моста через р. Оку в г. Муроме, с соблюдением требуемых сроков оборачиваемости опалубки и забетонированные конструкции не имели дефектов и трещин. В результате проведенной работы было установлено, что с целью моделирования процесса твердения бетона, его тепловыделения и сроков набора прочности для обеспечения ускоренных режимов возведения пилонов и сокращения сроков оборачиваемости опалубки можно применять различные методы, в том числе трубное охлаждение твердеющего бетона водой.

А физическое моделирование процесса прогрева бетона с помощью тепловых генераторов и греющих проводов и практика его использования при строительстве здания академии дзюдо позволили существенно сократить потребность в электроэнергии, уменьшить сроки строительства объекта и получить готовые конструктивные элементы высокого качества.

В работе также показано, что применительно к внеклассовым сооружениям для каждого конструктивного элемента возможно установить индивидуальный подход к процессу бетонирования с помощью рационального физического моделирования теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне конструкций, использования различных

методов исследования температурного режима твердеющего бетона в зависимости от граничных условий, заданных в процессе проектирования и возведения объекта, которые в совокупности оказывают весомое влияние на гарантию получения требуемых потребительских свойств всей возводимой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 1. 2007. С. 21–26.
2. Пряхин Д.В. Исследование работы вантового пролётного строения моста методами физического моделирования // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». № 10. М.: 2009. С. 11–13.
3. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Ильин А.А., Соколов С.Б. Выбор технологических параметров производства бетонных работ при возведении массивных ростверков и опор арочного пилона вантового моста через реку Москву // Научные труды ОАО ЦНИИС «Исследование транспортных сооружений». № 230. М.: ЦНИИС, 2006. С. 24–30.
4. Соловьянчик А.Р., Коротин В.Н., Шифрин С.А., Вейцман С.Г. Опыт снижения трещинообразования в бетоне от температурных

воздействий при сооружении Гагаринского тоннеля // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. № 3–4. С. 53–59.

5. Величко В.П. Методика использования гидравлических аналогий В.С. Лукьянова при разработке алгоритма и решении на ЭВМ задач транспортного строительства // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 100. М.: ЦНИИС, 1987. С. 15–22.

6. Гинзбург А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2014. № 1. С. 98–110.

7. Соловьянчик А.Р., Пуляев И.С. Предупреждение трещинообразования в бетоне при возведении нижних частей пилонов вантового моста через реку Оку на обходе города Мурома // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2008. № 1. С. 285–295.

8. Евланов С.Ф. Технологические трещины на поверхности монолитных пролётных строений. Научные труды ОАО ЦНИИС «Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов». № 208. М.: ЦНИИС, 2002. С. 27–36.

9. Xu, G., He, C., Lu, D., Wang, S. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata // Thin-Walled Structures. 2019. v. 144, 23 p.

10. Concu, G., Trulli, N. Concrete defects sizing by means of ultrasonic velocity maps // Buildings. 2018. v. 8(12). 19 p.

11. Пассек В.В., Заковенко В.В., Антонов Е.А., Ефремов А.Н. Применение искусственного охлаждения в процессе управления температурным режимом возводимых железобетонных арок // Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам». № 213. М.: ЦНИИС, 2002. С. 73–75.

12. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.

13. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.Г. Реализация концепции «качество» при сооружении Гагаринского тоннеля в Москве // Научные труды ОАО ЦНИИС «Технологии и качество возводимых конструкций из монолитного бетона». № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 206–212.

14. Пассек В.В., Соловьянчик А.Р. Методика исследований температурного режима балок пролётных строений мостов в процессе те-

пловлажностной обработки // Сборник научных трудов ЦНИИС «Температурный режим и вопросы повышения устойчивости и долговечности транспортных сооружений на БАМ». М.: ЦНИИС, 1980. С. 97–103.

15. Zvorykin, A., Mahdi, M., Popov, R., Barati Far, K., Pioro, I. Heat transfer to supercritical water (liquid-like state) flowing in a short vertical bare tube with upward flow. // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE 9. 2017. 14 p.

16. Solovyanchik A.R., Krylov B.A., Malinsky E.N. Inherent thermal stress distributions in concrete structures and method for their control. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium. Munich, 1994. 5 p.

17. Лукьянов В.С., Соловьянчик А.Р. Физические основы прогнозирования собственного термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 73. М.: ЦНИИС, 1972. С. 36–42.

18. Лукьянов В.С., Денисов И.И. Расчёт термоупругих деформаций массивных бетонных опор мостов для разработки мер по повышению их трещиностойкости // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 36. М.: ЦНИИС, 1970. С. 4–43.

19. Соловьянчик А.Р., Величко В.П., Зорина В.А. Разработка новой методики исследования температурного режима, прочности твердеющего бетона и термонапряжённого состояния конструкций транспортных сооружений с помощью ПК // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 112. М.: ЦНИИС, 1992. С. 75–77.

20. Соловьянчик А.Р., Величко В.П., Зорина В.А. Расчёт теплового и термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций с изменённой геометрией в процессе их изготовления. (ZA200) // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 108. М.: ЦНИИС, 1989. С. 10–15.

21. Pulyaev, S., Pulyaev, I., Korovyakov, V., Sitkin, A. Research of hydration heat of Portland cement used in bridge construction of Kerch Strait. // MATEC Web of Conferences. 2018. v. 251, 7 p.

22. Pulyaev, I., Pulyaev, S., Bazhenov, Y., Fetisova, A., Shcherbeneva, O. Effect of thermal induced stress of concrete on performance characteristics of constructions // 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. v. 97, 10 p.

23. Kollegger, J., Kromoser, B., Suza, D. Erection of bridges and shells without formwork—

challenges for the computational modelling // *Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2018*. 2018. pp. 43–54.

24. Пуляев И.С., Дудаева А.Н. Исследование температурного режима твердеющего бетона верхних ярусов верхней части пилонов при строительстве моста через р. Оку на обходе г. Муром // *Научные труды ОАО ЦНИИС «Испытания и расчёты конструкций транспортных сооружений»*. № 251. М.: ЦНИИС, 2009. С. 45–52.

25. Балючик Э.А., Величко В.П., Черный К.Д. Изготовление блоков облицовки в зимний период строительства моста через реку Ангара // *Научно-технический журнал «Транспортное строительство»*. 2012. № 10. С. 4–7.

26. Соколов С.Б. Влияние колебаний температуры воздуха в тепляках на температуру твердеющего бетона при возведении монолитных плитно-ребристых пролётных строений в холодный период года // *Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам»*. № 213. М.: ЦНИИС, 2002. С. 167–172.

27. Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М.: ГАСИС, 2004. 470 с.

28. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.А. Опыт использования неполного обжата бетона для предупреждения появления трещин в конструктивных элементах транспортных сооружений // *Научные труды ОАО ЦНИИС «Технология и качество возводимых конструкций из монолитного бетона»*. № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 200–205.

29. Величко В.П., Черный К.Д. Учет напряженно-деформированного состояния в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения // *Научно-технический журнал «Транспортное строительство»*. 2013. № 2. С. 11–13.

30. Космин В.В., Мозалев С.В. Проблемы исследований, проектирования и строительства мостов больших пролётов // *Научно-технический журнал «Вестник мостостроения»*. 2014. № 1. С. 19–24.

31. Соловьянчик А.Р., С.М. Пуляев, И.С. Пуляев. Исследование тепловыделения цемента, используемых при строительстве мостового перехода через Керченский пролив // *Научно-технический журнал «Вестник СибАДИ»*. 2018. № 2. С. 283–293.

32. Пуляев И.С., Пуляев С.М. К вопросу о максимальной температуре основания, при которой допускается укладка бетонной смеси при возведении транспортных сооружений //

Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2011. № 2. С. 295–304.

33. Балючик Э.А., Черный К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами // *Сборник научных трудов ЦНИИС*. № 257. М.: ЦНИИС, 2010. С. 49–57.

REFERENCES

1. Tarasov A.M., Bobrov F.YU., Pryakhin D.V. *Primeneniye fizicheskogo modelirovaniya pri stroitel'stve mostov i drugih sooruzheniy* [Application of physical modeling in the construction of bridges and other structures]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2007; 1: 21–26 (in Russian).

2. Pryakhin D.V. *Issledovaniye raboty vantovogo prolotnogo stroyeniya mosta metodami fizicheskogo modelirovaniya* [Investigation of the cable-stayed bridge structure using physical modeling methods]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Transportnoye stroitel'stvo»*. 2009; 10: 11–13 (in Russian).

3. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Il'in A.A., Sokolov S.B. *Vybor tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva betonnykh rabot pri vozvedenii massivnykh rostverkov i opor arochnogo pilona vantovogo mosta cherez reku Moskvu* [Selection of technological parameters for the production of concrete works during the erection of massive grillage and support of the arch bridge of the cable bridge over the Moscow river]. *Nauchnyye trudy ОАО TSNIIS Issledovaniye transportnykh sooruzheniy*. 2006; 230: 24–30 (in Russian).

4. Solov'yanchik A.R., Korotin V.N., Shifrin S.A., Veytsman S.G. *Opyt snizheniya treshchinnobrazovaniya v betone ot temperaturnykh vozdeystviy pri sooruzhenii Gagarinskogo tonneliya* [Experience in reducing cracking in concrete from thermal effects during the construction of the Gagarinsky tunnel]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2002; 3–4: 53–59 (in Russian).

5. Velichko V.P. *Metodika ispol'zovaniya gidravlicheskh analogiy V.S. Luk'yanova pri razrabotke algoritma i reshenii na EVM zadach transportnogo stroitel'stva* [Method of using hydraulic analogies of V. S. Lukyanov in the development of the algorithm and the solution of computer problems of transport construction]. *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIS*. 1987; 100: 15–22 (in Russian).

6. Ginzburg A.V. *Obespecheniye vysokogo kachestva i effektivnosti rabot pri vozvedenii tonneley iz monolitnogo betona* [Ensuring the high

quality and efficiency of work in the construction of tunnels from monolithic concrete]. *Vestnik MGSU*. 2014; 1: 98–110 (in Russian).

7. Solov'yanchik A.R., Pulyayev I.S. Preduprezhdeniye treshchinoobrazovaniya v betone pri vozvedenii nizhnikh chastey pilonov vantovogo mosta cherez reku Oku na obkhode goroda Muroma [Prevention of cracking in concrete when erecting the lower parts of the pylons of the cable-stayed bridge across the Oka river on the Murom bypass]. *Vestnik MGSU*. 2008; 1: 285–295 (in Russian).

8. Yevlanov S.F. Tekhnologicheskiye treshchiny na poverkhnosti monolitnykh prolotnykh stroyeniy [Technological cracks on the surface of monolithic building structures]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Problemy normirovaniya i issledovaniya potrebitel'skikh svoystv mostov*. 2002; 208: 27–36 (in Russian).

9. Xu, G., He, C., Lu, D., Wang, S. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata. *Thin-Walled Structures*. 2019; 144: 23 p.

10. Concu, G., Trulli, N. Concrete defects sizing by means of ultrasonic velocity maps. *Buildings*. 2018; 8(12): 19 p.

11. Passek V.V., Zakovenko V.V., Antonov Ye.A., Yefremov A.N. Primeneniye iskusstvennogo okhlazhdeniya v protsesse upravleniya temperaturnym rezhimom vozvodimyykh zhelezobetonnykh arok [Application of artificial cooling in the process of controlling the temperature regime of erected reinforced concrete arches]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*, 2002; 213: 73–75 (in Russian).

12. Vasil'yev A.I., Veytsman S.G. Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya [Modern trends and problems of the domestic bridge construction]. *Vestnik mostostroyeniya*. 2015; 1: 2–17 (in Russian).

13. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.G. Realizatsiya kontseptsii «kachestvo» pri sooruzhenii Gagarinskogo tunnelya v g. Moskve [Realization of the “quality” concept in the construction of the Gagarinsky tunnel in Moscow]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Tekhnologii i kachestvo vozvodimyykh konstrukt-siy iz monolitnogo betona*. 2003; 217: 206–212 (in Russian).

14. Passek V.V., Solov'yanchik A.R. Metodika issledovaniy temperaturnogo rezhima balok prolotnykh stroyeniy mostov v protsesse teplovlazhnostnoy obrabotki [Technique for studying the temperature conditions of the beams of bridge building structures in the process of heat

and moisture treatment]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS Temperaturnyy rezhim i voprosy povysheniya ustoychivosti i dolgovechnosti transportnykh sooruzheniy na BAM*. Moscow: TSNIIS, 1980: 97–103 (in Russian).

15. Zvorykin, A., Mahdi, M., Popov, R., Barati Far, K., Pioro, I. Heat transfer to supercritical water (liquid-like state) flowing in a short vertical bare tube with upward flow. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE 9*. 2017. 14 p.

16. Solov'yanchik A.R., Krylov B.A., Malinsky E.N. Inherent thermal stress distributions in concrete structures and method for their control. *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium*. Munich, 1994. 5 p.

17. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhonnogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukt-siy [Physical basis for predicting the intrinsic thermo-stress state of concrete and reinforced concrete structures]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 1972; 73: 36–42 (in Russian).

18. Luk'yanov V.S., Denisov I.I. Raschot termouprugikh deformatsiy massivnykh betonnykh opor mostov dlya razrabotki mer po povysheniyu ikh treshchinostoykosti [Calculation of thermo-elastic deformations of massive concrete bridge supports to develop measures to increase their fracture toughness]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 1970; 36: 4–43 (in Russian).

19. Solov'yanchik A.R., Velichko V.P., Zorina V.A. Razrabotka novoy metodiki issledovaniya temperaturnogo rezhima, prochnosti tverdeyushchego betona i termonapryazhyonnogo sostoyaniya konstrukcij transportnykh sooruzheniy s pomoshch'yu PK [Development of a new methodology for the temperature regime, the strength of hardening concrete and the thermal stress state of structures of transport structures with the PC]. *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIS*. 1992; 112: 75–77 (in Russian).

20. Solov'yanchik A.R., Velichko V.P., Zorina V.A. Raschyot teplovogo i termonapryazhyonnogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij s izmenyonnoy geometriey v processe ih izgotovleniya. (ZA200) [Calculation of thermal and thermal stress state of concrete and reinforced concrete structures with changed geometry during their manufacture. (ZA200)]. *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIS*. 1989; 108: 10–15 (in Russian).

21. Pulyaev S., Pulyaev I., Korovyakov V., Sitkin, A. Research of hydration heat of Portland ce-

ment used in bridge construction of Kerch Strait. MATEC Web of Conferences. 2018; 251: 7 p.

22. Pulyaev, I., Pulyaev, S., Bazhenov, Y., Fetisova, A., Shcherbeneva, O. Effect of thermal induced stress of concrete on performance characteristics of constructions. *22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019*. 2019; 97: 10 p.

23. Kollegger, J., Kromoser, B., Suza, D. Erection of bridges and shells without formwork-challenges for the computational modelling. *Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2018*. 2018: 43–54.

24. Pulyayev I.S., Dudayeva A.N. Issledovaniye temperaturnogo rezhima tverdeyushchego betona verkhnykh yarusov verkhney chasti pilonov pri stroitel'stve mosta cherez r. Oku na obkhode g. Muroma [Investigation of the temperature regime of hardening concrete of the upper layers of the upper part of the pylons during the construction of the bridge over the Oka River on the Murom bypass]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Ispytaniya i raschoty konstruktsiy transportnykh sooruzheniy*. 2009; 251: 45–52 (in Russian).

25. Balyuchik E.A., Velichko V.P., Chernyy K.D. Izgotovleniye blokov oblitsovki v zimniy period stroitel'stva mosta cherez reku Angaru [Manufacturing of cladding units during the winter construction of a bridge across the Angara River]. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2012; 10: 4–7 (in Russian).

26. Sokolov S.B. Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukh v teplyakakh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristyykh prolotnykh stroyeniy v kholodnyy period goda [Influence of air temperature fluctuations in hotbeds on the temperature of hardening concrete during the erection of monolithic slab-ribbed spans during the cold period of the year]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*. 2002; 213: 167–172 (in Russian).

27. Krasnovskiy B.M. Inzhenerno-fizicheskiye osnovy metodov zimnego betonirovaniya [Engineering and physical foundations of winter concreting methods]. Moscow, GASIS, 2004. 470 p.

28. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.A. Opyt ispol'zovaniya nepolnogo obzhatiya betona dlya preduprezhdeniya po'yavleniya treshchin v konstruktivnykh elementakh transportnykh sooruzheniy [Experience in the use of incomplete compression of concrete to prevent the appearance of cracks in structural elements of transport structures]. *Nauchnyye trudy*

OAO TSNIIS *Tekhnologiya i kachestvo vozvodimykh konstruktsiy iz monolitnogo betona*. 2003; 217: 200–205 (in Russian)

29. Velichko V.P., Chernyy K.D. Uchet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sborno-monolitnykh oporakh mostov na stadii ikh sooruzheniya [Account of the stress-strain state in the team-monolithic bridge supports at the stage of their construction]. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2013; 2: 11–13 (in Russian).

30. Kosmin V.V., Mozalev S.V. Problemy issledovaniy, proyektirovaniya i stroitel'stva mostov bol'shikh prolotov [Problems of research, design and construction of large span bridges]. *Vestnik mostostroyeniya*. 2014; 1: 19–24 (in Russian).

31. Solov'yanchik A.R., S.M. Pulyayev, I.S. Pulyayev. Issledovaniye teplovydeleniya tsementov, ispol'zuyemykh pri stroitel'stve mostovogo perekhoda cherez Kerchenskiy proliv [Investigation of the heat release of cements used in the construction of a bridge across the Kerch Strait]. *Vestnik SibADI*. 2018; 2: 283–293 (in Russian).

32. Pulyayev I.S., Pulyayev S.M. K voprosu o maksimal'noy temperature osnovaniya, pri kotoroy dopuskayetsya ukladka betonnoy smesi pri vozvedenii transportnykh sooruzheniy [To the question of the maximum temperature of the substrate, at which it is allowed to lay a concrete mixture in the construction of transport facilities]. *Vestnik MGSU*. 2011; 2: 295–304 (in Russian).

33. Balyuchik E.A., Chernyy K.D. Povysheniye treshchinostoykosti opor mostov iz monolitnogo betona konstruktivnymi metodami [Increasing the crack resistance of bridge supports made of solid concrete with constructive methods]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 2010; 257: 49–57 (in Russian).

Поступила 06.05.2018, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пуляев Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», ORCID ID 0000-0002-7785-2784 (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

Пуляев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительные материалы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», ORCID ID 0000-0002-6368-0547 (129337, г.Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Pulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Binders and Concretes' Technologies, National Research Moscow State University of Civil Engineering, ORCID ID 0000-0002-7785-2784 (Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe Hw).

Sergey M. Pulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Construction Materials and

Engineering Department , National Research Moscow State University of Civil Engineering ORCID ID 0000-0002-6368-0547 (129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe Hw).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пуляев И.С. Постановка задачи, проведение расчётов, анализ результатов расчётов.

Пуляев С.М. Обработка результатов расчётов, редактирование статьи, оформление статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan S. Pulyaev – statement of the problem; calculations; analysis of the calculation results.

Sergey M. Pulyaev – processing of the calculation results; article editing; article structuring.

УДК 678.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ СКОПА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ МЕТОДОМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА

И.Л. Чулкова¹, И.А. Селиванов², В.Д. Галдина¹

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Проектвенстрой»,
Россия, Пермский край, г. Очер
ver.galdina@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Изучение процессов структурообразования цементных композиций и разработка эффективных технологий строительных материалов является актуальной задачей для строительного материаловедения. Успешной реализацией этой задачи может служить применение крупнотоннажного техногенного продукта целлюлозно-бумажных предприятий – скопа – в качестве волокнистого заполнителя в органоминеральных композициях. В статье проанализированы способы использования скопа при производстве строительных материалов. Цель работы заключалась в исследовании влияния добавки скопа на процессы структурообразования цементного камня методом количественного рентгенофазового анализа.

Материалы и методы. Органоминеральные композиции получали на основе портландцемента и скопа. Фазовые составы скопа, портландцемента и процессы структурообразования цементного камня в органоминеральных композициях изучали количественным рентгенофазовым анализом.

Результаты. Определены фазовые составы минеральных примесей скопа и целлюлозы, цемента, цементного камня и органоминеральных композиций двух составов, содержащих 25 и 75% мас. скопа в качестве заполнителя.

Обсуждение и заключение. Введение скопа в качестве заполнителя в органоминеральные композиции вызывает торможение процессов гидратации цемента. Присутствие скопа в твердеющей органоминеральной композиции приводит к изменению в составе и структуре цементного камня по сравнению с фазовым составом цементного камня без добавок. Результатом таких изменений является значительное увеличение количества кальцита, небольшое – ватерита и существенное уменьшение содержания портландита. Установлено, что эффективная совместная работа армирующего компонента скопа с цементной матрицей возможна при лимитированном количестве скопа в органоминеральных композициях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральный состав, органоминеральные композиции, рентгенофазовый анализ, скоп, структурообразование, фазовый состав, целлюлоза.

© И.Л. Чулкова, И.А. Селиванов, В.Д. Галдина



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE SCOPE ADDITION ON THE STRUCTURE FORMATION OF THE CEMENT STONE BY THE METHOD OF QUANTITATIVE X-RAY PHASE ANALYSIS

I.L. Chulkova¹, I. A. Selivanov², V.D. Galdina¹

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

²Limited Liability Company «Proektvenstroy»,
Ocher, the Perm region, Russia
ver.galdina@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The processes of structure formation of cement compositions and the development of effective technologies of building materials is an urgent task for building material science. The use of large-scale man-made product of pulp and paper enterprises – osprey as a fibrous filler in organic and mineral compositions is the successful decision of the problem. The paper analyzes the ways of using osprey in the building materials' production. The aim of the research is to study the osprey influence on the processes of structure formation of cement stone by quantitative x-ray phase analysis.

Materials and methods. The organic and mineral compositions were obtained on the basis of portland cement and osprey. The authors studied the compositions' phase of osprey, portland cement and the processes of cement stone structure formation in organ and mineral compositions by quantitative x-ray phase analysis.

Results. The authors determined the compositions' phase of mineral impurities of osprey, cellulose, cement, cement stone, organic and mineral compositions and two compositions containing 25 and 75% by weight.

Discussion and conclusions. The osprey application as a filler in the organic and mineral composition causes inhibition of processes of cement hydration. The presence of osprey in the hardening organic and mineral composition leads to a change in the composition and structure of the cement stone in comparison with the phase composition of the cement stone without additives. The result of these changes is a significant increase in the amount of calcite, waterite and a significant decrease in the amount of portland. The authors establish that the effective joint work of the reinforcing component of the osprey with the cement matrix is possible with a limited amount of osprey in organic and mineral compositions.

KEYWORDS: mineral composition, organic and mineral compositions, x-ray phase analysis, osprey, structure formation, phase composition, cellulose.

© I.L. Chulkova, I. A. Selivanov, V.D. Galdina



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие строительного производства обуславливает необходимость создания эффективных высококачественных материалов, применение которых является экономически целесообразным и позволяет сократить энергетические затраты и расход сырьевых ресурсов. На предприятии ООО «Пермский картон» крупнотоннажным техногенным продуктом является скоп – осадок, образующийся при очистке технологических стоков при производстве бумаги и картона. Ежегодный выход скопа составляет 4,2 тыс. т (1,5 тыс. т в год по абсолютно сухому состоянию). Использование скопа в основном производстве нецелесообразно вследствие ухудшения качества готовой продукции и снижения производительности формующего оборудования, поэтому на предприятии утилизируется лишь незначительная часть скопа. Остальное количество скопа вывозится в отвалы. Вывоз и хранение скопа в отвалах обходится ежегодно в крупную сумму денег и загрязняет окружающую среду, поэтому актуальны исследования, направленные на разработку технологий по использованию скопа при производстве высококачественных экологически чистых и дешёвых строительных материалов и изделий.

Анализ научно-технической и патентной литературы показал, что скоп, как и другие отходы целлюлозно-бумажного производства, может быть применен при производстве керамических, теплоизоляционных и акустических материалов и изделий, для изготовления древесноволокнистых плит и плит несъёмной опалубки, в качестве компонента бетонной смеси для повышения ее удобоукладываемости и снижения коэффициента теплопроводности. Физические и химические свойства скопа, существующие способы и технологии его утилизации для изготовления материалов

строительного назначения отражены в работах¹ [1, 2, 3].

Отходы производства целлюлозно-бумажных комбинатов по составу и физическим свойствам сходны с древесным сырьем, используемым для изготовления материалов на основе древесно-цементной смеси. В работе² изучены свойства древесно-цементных материалов с заполнителями из деревоотходов: скопа, коры, отсева при их различном сочетании и соотношении. Наибольшую прочность при сжатии 4,48 МПа имеют образцы материала с заполнителем в виде смеси скопа и отсева, взятых в процентном соотношении 75/25, что превосходит наименьшее значение конструкционного арболита класса В 3,5 на 27%.

Использование гранулированного органического сырья на основе торфа в качестве заполнителя легких бетонов позволяет значительно улучшить его звукоизолирующие свойства во всех диапазонах звуковых волн за счет формирования направленно изменяемой структуры, а также вследствие повышенной пористости самого органического материала, его природы и волокнистого строения растительного сырья [4].

Возможность использования скопа в качестве вспучивающей и выгорающей добавки в производстве искусственных пористых заполнителей – керамзитового и аглопоритового гравия – рассмотрена в работах [5, 6]. Применение скопа как опудривающей добавки при получении керамзита позволяет увеличить интервал вспучивания глинистого сырья на 30 – 60 °С и понизить насыпную плотность керамзита на 60 – 100 кг/м³ [7].

Волокнистая структура скопа, а также незначительное количество в составе минеральных примесей, определяет одно из направлений его применения в качестве волокнистого заполнителя при изготовлении теплоизоля-

¹ Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Л. : Стройиздат, 1990. 415 с.

² Копарев В. С. Перспективы использования скопа в качестве сырья для производства древесно-цементной композиции // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. тр. международной науч.-практ. конференции. Воронеж, 2014. Т. 2. № 3. С. 92–95.

ционных материалов и изделий^{3, 4, 5} [8] и декоративно-акустических материалов⁶. Приводимые в литературе составы композиций для теплоизоляционных материалов существенно различаются по виду вяжущего вещества и содержанию компонентов.

Так, в патенте⁷ в качестве сырьевых компонентов для теплоизоляционных материалов используют гипсовый шлам производства молочной кислоты и осадок после брожения, а также опилки или скоп в соотношении компонентов 1:3:6 по массе в перерасчёте на сухое вещество. Прочность теплоизоляционных изделий при изгибе составляет 4,8 – 5,4 МПа.

По изобретению⁸ для изготовления теплоизоляционного материала рекомендована смесь, включающая, % мас.: скоп 52 – 58,5, кремнефтористый натрий 3,5 – 4,5, вспученный перлитовый песок 16,3 – 19,0, диаммоний фосфат 4,0 – 6,0, гидрофобизатор 0,005 – 0,015 и активный ил 12,0 – 24,0.

В России была внедрена технология изготовления теплоизоляционного материала следующего состава, % мас.: скоп 30 – 50, вспученный перлит 30 – 50, битум с диспергантом

20, 5% фтористый натрий 5%, диаммоний фосфат 33% [8].

Разработана сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционного материала, которая содержит, мас. %: жидкое стекло 16 – 20, зола теплоэлектростанций 64 – 68, скоп 9 – 13⁹.

Сырьевая смесь для изготовления декоративно-акустического материала включает, % мас.: гипс 38 – 45, скоп 27 – 42, пенообразователь 0,05 – 0,25, поливинилацетатная дисперсия 2 – 6, раствор серной кислоты 1 – 2, вода – остальное¹⁰.

Рекомендована технология производства твёрдых и мягких древесно-волоконистых плит, предусматривающая содержание скопа от 5 до 30% при производстве твёрдых плит и от 10 до 50% мас. при производстве мягких плит. Введение скопа в композицию для изготовления мягких плит приводит к повышению их пластичности и прочностных свойств [9]. Содержание скопа в количестве 50 – 65% мас. при изготовлении пресс-композиций при повышенной температуре позволяет повысить прочность изделий при статическом изгибе в 4 раза¹¹.

³ Патент РФ № 2095328 С1 МПК6 C04B28/14, B32B13/08. Состав для изготовления изделий из отходов производства молочной кислоты / Л.В. Новинюк, Д.А. Береженко; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых ароматизаторов, кислот и красителей; заявка № 94041955/08 от 21.11.1994, опубл. 10.11.1997. Бюл. № 6. 4 с.

⁴ Патент РФ № 1079645 А C04B43/02, 43/12. Масса для изготовления теплоизоляционного материала / О.Ш. Кикава, Б.К. Байков, С.М. Нейман, Н.С. Шекина, М.А. Кочеткова, А.И. Волков, З.О. Матвеева, Ю.И. Черноусов; заявитель и патентообладатель Центральная научно-исследовательская лаборатория «Мособлстрой ЦНИЛ» Главмособлстроя; заявка № 3424417/29-33 от 15.04.1982, опубл. 15.03.1984. Бюл. № 10. 10 с.

⁵ Патент РФ № 1435567 А1 C04B28/26, 18/06. Сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционного материала / А.К. Гармуте, Б.А. Валинчене; заявитель и патентообладатель Литовский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры; заявка № 4229347/29-33 от 13.04.1987, опубл. 07.11.1988. Бюл. № 41. 4 с.

⁶ Патент РФ № 1217840 А C04B28/14. Сырьевая смесь для изготовления декоративно-акустического материала / Е.С. Фирскин, О.Ш. Кикава, Т.Е. Кобидзе, В.М. Косарев, М.А. Кочеткова, А.П. Меркин, Л.Б. Меньшиков, Б.М. Румянцев, Ю.Н. Савин; заявитель и патентообладатель Центральная научно-исследовательская лаборатория «Мособлстрой-ЦНИЛ»; заявка № 3825631/29-33 от 19.11.1984, опубл. 15.03.1986. Бюл. № 10. 6 с.

⁷ Патент РФ № 2095328 С1 МПК6 C04B28/14, B32B13/08. 4 с.

⁸ Патент РФ № 1079645 А C04B43/02, 43/12. 10 с.

⁹ Копарев В. С. Перспективы использования скопа в качестве сырья для производства древесно-цементной композиции // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. тр. международной науч.-практ. конференции. Воронеж, 2014. Т. 2. № 3. С. 92–95.

¹⁰ Патент РФ № 2095328 С1 МПК6 C04B28/14, B32B13/08. Состав для изготовления изделий из отходов производства молочной кислоты / Л.В. Новинюк, Д.А. Береженко; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых ароматизаторов, кислот и красителей; заявка № 94041955/08 от 21.11.1994, опубл. 10.11.1997. Бюл. № 6. 4 с.

Согласно изобретению¹² композиция для производства волокнистых плит содержит скоп и макулатурное волокно, что позволяет утилизировать макулатуру и увеличить содержание скопа в композиции плит до 85%, а также получить прочные и пластичные плиты и сократить время их изготовления.

Уменьшение коэффициента теплопроводности бетона достигается путём введения в бетонную смесь, используемую для изготовления ограждающих панелей различного назначения, скопа при следующем соотношении компонентов в частях по массе: цемент 0,4 – 3; скоп 1 – 1,2; вода 3 – 4; гипс 0,3 – 3. Полученные изделия уплотняют и выдерживают 28 сут до набора оптимальной прочности¹³.

В составе композиционных материалов скоп может быть использован не только как волокнистый армирующий компонент, но и в качестве материала, обладающего связующей способностью и сорбционными свойствами [1, 2, 3, 10, 11]. Вяжущая способность скопа обусловлена его химическим строением и адгезионными свойствами. Вяжущие свойства проявляются при высыхании системы «скоп-вода», когда волокна скопа сближаются и переплетаются между собой. При этом за счёт клеящей способности лигнина возникают жёсткие связи между отдельными волокнами целлюлозы. Кроме того, лигнин является поверхностно-активным веществом, улучшающим смачивание и адгезию скопа к гидрофильным поверхностям [12]. Активность волокон целлюлозы, которые составляют основную массу вещества скопа, определяет высокую адгезию продуктов гидратации цементного вяжущего к их поверхности.

Степень взаимодействия волокон скопа с цементным камнем, а также влияние скопа на структурообразование цементной композиции определяют возможность использования скопа как компонента при производстве материалов строительного назначения. Однако

отдельные химические и минеральные компоненты из состава скопа могут оказать негативное влияние на процессы гидратации цемента. Вопросы, связанные с изучением процессов структурообразования органоминеральных композиций со скопом в качестве заполнителя как компонента растительного происхождения изучены недостаточно и представляют значительный научный и практический интерес. Выявление особенностей структурообразования и формирования свойств цементного камня в присутствии скопа как заполнителя позволит обоснованно назначать его содержание в составах органоминеральных композиций.

Цель работы заключалась в исследовании влияния добавки скопа на процессы структурообразования цементного камня методом количественного рентгенофазового анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления органоминеральных композиций были использованы скоп предприятия ООО «Пермский картон» и портландцемент предприятия ООО «Горнозаводскцемент» ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2016.

Скоп образуется в виде осадка при промывке технологического оборудования в процессе формирования бумажной массы. Ранее выполненными исследованиями было показано [1, 2, 3, 10], что состав скопа, поступающего с очистных установок ООО «Пермский картон», относительно стабилен. Скоп имеет влажность около 300% мас., pH = 5,9 – 6,5. Дисперсная фаза скопа представлена волокнами целлюлозы (75–90% по объёму) с примесями лигнина, карбонатов натрия, калия, магния и кальция, а также небольшого количества фосфатов и нитратов этих же металлов. Содержание минеральной составляющей – около 0,5 % мас.

Гранулометрический состав и структуру скопа исследовали при помощи оптической микроскопии на поляризационном микроскопе

¹¹ Патент РФ № 1079645 А С04В43/02, 43/12. Масса для изготовления теплоизоляционного материала / О.Ш. Кикава, Б.К. Байков, С.М. Нейман, Н.С. Щекина, М.А. Кочеткова, А.И. Волков, З.О. Матвеева, Ю.И. Черноусов; заявитель и патентообладатель Центральная научно-исследовательская лаборатория «Мособлстрой ЦНИЛ» Главмособлстроя; заявка № 3424417/29-33 от 15.04.1982, опубл. 15.03.1984. Бюл. № 10. 10 с.

¹² Патент РФ № 1435567 А1 С04В28/26, 18/06. Сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционного материала / А.К. Гармуте, Б.А. Валинчене; заявитель и патентообладатель Литовский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры; заявка № 4229347/29–33 от 13.04.1987, опубл. 07.11.1988. Бюл. № 41. 4 с.

¹³ Патент РФ № 1217840 А С04В28/14. Сырьевая смесь для изготовления декоративно-акустического материала / Е.С. Фирскин, О.Ш. Кикава, Т.Е. Кобидзе, В.М. Косарев, М.А. Кочеткова, А.П. Меркин, Л.Б. Меньшиков, Б.М. Румянцев, Ю.Н. Савин; заявитель и патентообладатель Центральная научно-исследовательская лаборатория «Мособлстрой-ЦНИЛ»; заявка № 3825631/29-33 от 19.11.1984, опубл. 15.03.1986. Бюл. № 10. 6 с.

МИН-8. Образцы скопа готовили в виде петрографических шлифов и иммерсионных препаратов. Степень помола определяли в соответствии с ГОСТ 14363.4–89.

Влияние скопа как заполнителя в органоминеральных композициях на процессы структурообразования цементного камня изучали при проведении количественного рентгенофазового анализа (РФА) исходных материалов и продуктов твердения их композиций. Для исследования были подготовлены гомогенизированные порошки с размером зерен мельче 63 мкм путем растирания в агатовой ступке агатовым пестиком предварительно спрессованных и твердевших в эксикаторе в течение 28 сут образцов-шайб разных исходных составов. Образцы-шайбы диаметром 5 см из скопа и органоминеральных композиций получали методом прессования при уплотняющем давлении 20 МПа. Образцы цементного камня получали из теста нормальной густоты. Органоминеральные композиции исследовали двух составов. Влажность скопа при изготовлении образцов из органоминеральных смесей составляла 300% мас. Состав 1 содержал 75 % мас. цемента и 25% мас. скопа, состав 2 – 25 % мас. цемента и 75% мас. скопа. При влажности скопа 300% содержание волокон целлюлозы в составах 1 и 2 в пересчете на сухое вещество составляло соответственно 7,69 и 20,00 мас. %.

Дифракционный экспериментальный материал для исследований получен на рентгеновской станции ARL 9900 WorkStation с использованием Co -излучения в интервале углов дифракции $2\Theta = 8^\circ, 80^\circ$ с шагом $0,02^\circ$. Рентгенометрическая диагностика кристаллических минеральных компонентов – качественный рентгенофазовый анализ проводилась на основе базы дифракционных данных PDF-2 с использованием программы Crystallographica Search-Match (OxfordCryosystems). Количественный РФА в варианте полнопрофильного анализа проводился с применением программы DDMv.1.95e с использованием алгоритма Derivative Difference Minimization (минимизация производной разностной кривой) [12].

Применение этого алгоритма при полнопрофильном количественном РФА позволяет не уточнять параметры линии фона. Такой подход наиболее целесообразен в случае сложноструктурированной линии фона рентгенограммы. В качестве структурных моделей кристаллических фаз использовались данные из международной базы структурных данных неорганических веществ Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

Процессы гидратации цемента оценивали по содержанию образовавшихся кристаллических фаз – портландита, кальцита, ватерита и гипса и количеству негидратированных клинкерных минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам определения реологических, технологических и физико-механических свойств скопа при изготовлении строительных материалов и изделий на его основе рекомендована влажность скопа не более 300% мас. [1, 2, 3, 10]. При влажности 300% мас. скоп представляет собой высококонцентрированную однородную водную дисперсию без водоотделения (вода адсорбирована волокнами целлюлозы). Дальнейшее удаление влаги из скопа технологически и экономически нецелесообразно, так как ухудшается однородность смеси при перемешивании скопа с цементом и повышаются энергозатраты на сушку. Поэтому в экспериментальных исследованиях использован скоп с влажностью 300% мас. и плотностью 470 кг/м^3 . Твердая фаза водной дисперсии состоит из волокон целлюлозы длиной 150 – 250 мкм, толщиной до 5 мкм (рисунок 1). Степень помола скопа равна 60 – 63° по шкале Шоппер-Риглера.

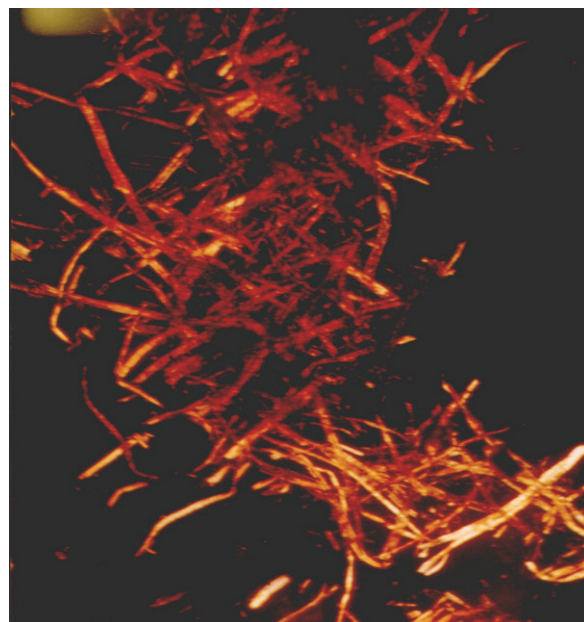


Рисунок 1 – Структура скопа под микроскопом, увеличение 200 $\times$

Figure 1 – Pattern skop under a microscope, 200 $\times$

Неорганический остаток после прокаливания образца целлюлозы имеет следующий хи-

мический состав, % мас.: SiO_2 – 3,470; CaO – 2,040; Fe_2O_3 – 0,294; P_2O_5 – 0,128; Al_2O_3 – 2,220; Na_2O – 0,734; K_2O – 0,273; TiO_2 – 0,107; MgO – 0,735; SO_3 – 0,707; Cl – 0,263. Потери при прокаливании составляют 88,96% и относятся к органогенным элементам целлюлозы – C , O и H . Следовательно, количество минеральных примесей в образце целлюлозы составляет 11,04% мас. Особенностью скопа предприятия ООО «Пермский картон» является невысокое содержание в его химическом составе каолина, являющегося антикоагулянт.

Рентгенометрическая диагностика рентгенограммы целлюлозы показала, что в ее составе присутствуют минеральные примеси – α -кварц, кальцит, каолинит, доломит и полевошпат, отнесенный к альбиту. Результаты количественного РФА представлены на рисунке 2 в виде полнопрофильной диаграммы.

Известно, что увеличение реакционной способности целлюлозы зависит от уменьшения степени ее кристалличности [13]. На рентгенограмме исследуемого образца целлюлозы имеется узкий пик в области $2\theta = 26$ град. Ширина сигнала на рентгенограмме при $2\theta = 26$ град характеризует степень кристалличности

целлюлозы [14]. На основе рентгенографических данных содержание кристаллической компоненты в целлюлозе определяли методом Сигала [15] по формуле

$$X_{CR} = \frac{I_{200} - I_{AM}}{I_{200}},$$

где X_{CR} – степень кристалличности, отн. ед.; I_{200} – интенсивность максимальная, соответствующая кристаллической фазе целлюлозы, отн. ед.; I_{AM} – интенсивность, соответствующая аморфной фазе целлюлозы, отн. ед.

Используя разностную кривую на полнопрофильной диаграмме целлюлозы, которая представляет собой дифракционный профиль целлюлозы «очищенной» от дифракционных отражений кристаллических минеральных примесей (см. рисунок 2), получили значение степени кристалличности исследуемого образца целлюлозы по Сигалу, равное $X_{CR} = 0,53$ (рисунок 3). Таким образом, целлюлоза, содержащаяся в скопе, почти наполовину состоит из аморфного, потенциально, высокорекреакционного материала.

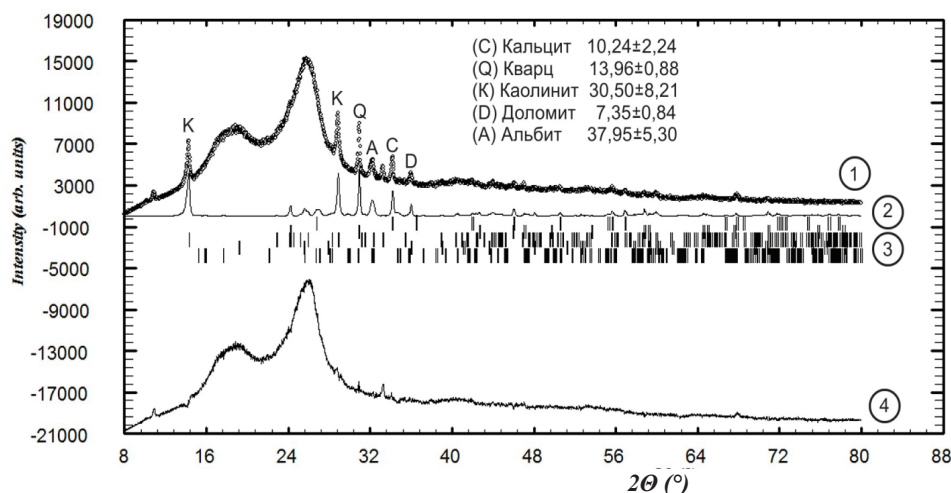


Рисунок 2 – Количественный рентгенофазовый анализ минеральных примесей целлюлозы. Цифрами обозначены: 1 – экспериментальная дифракционная кривая; 2 – расчетная дифракционная кривая; 3 – маркеры угловых положений отражений всех минеральных компонентов; 4 – разностная кривая = «эксперимент – расчет»

Figure 2 – Quantitative X-ray analysis of the cellulose chats. By numerals are marked out: 1 – experimental diffraction curved line; 2 – rated diffraction curved line; 3 – labels of angular reflexes of all mineral reductants; 4 – differential curved line = «experiment – calculation»

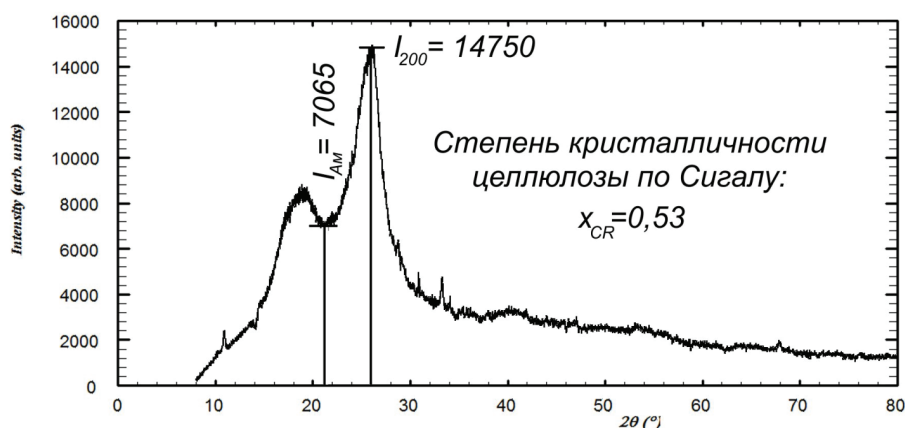


Рисунок 3 – Определение степени кристалличности образца целлюлозы по Сигалу

Figure 3 – Crystalline definition of the cellulose formation by Sigal

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ОАО «Горнозаводскцемент» имел следующий химический состав, % мас.: SiO_2 – 24,53; Al_2O_3 – 6,88; Fe_2O_3 – 2,52; CaO – 55,73; MgO – 5,43; SO_3 – 2,19; Na_2O – 2,19; прочее – 1,25.

Основная причина аналитических сложностей при проведении количественного РФА цемента заключается в наложении рентгеновских отражений основных минеральных фаз портландцемента – C_3S , $\text{b-C}_2\text{S}$, C_3A и C_4AF . Из-за этого единственный способ количественного РФА, а зачастую и обычной рентгенометрической диагностики, является полнопрофильный количественный РФА, имеющий в своей основе расчетное моделирование дифракционной кривой изучаемого материала.

Рентгенометрическая диагностика минеральных фаз образца портландцемента показала, что в его составе присутствуют клинкерные минеральные компоненты – трехкальциевый силикат (алит) C_3S , двухкальциевый силикат (белит) $\text{b-C}_2\text{S}$, трехкальциевый алюминат (алюминат) C_3A и четырехкальциевый алюмоферрит (целит) C_4AF , а также ангидрит CaSO_4 , двухводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и кальцит CaCO_3 . Структурные данные по этим фазам взяты из базы ICSD – C_3S триклинный (4331-ICSD), $\text{b-C}_2\text{S}$ (81096-ICSD), C_4AF (9197-ICSD), ангидрит (68592-ICSD), гипс (2057-ICSD), кальцит (18164-ICSD), а данные для ромбической модификации C_3A взяты из Crystallography Open Database (URL <http://www.crystallography.net/cod/2108392.html>).

Все значимые отражения на рентгенограмме были описаны расчетными дифракцион-

ными профилями. Для более адекватного описания рентгенограммы были приняты во внимание описанные в литературе неоднократные факты обнаружения в цементных клинкерах высокотемпературного полиморфа двухкальциевого ортосиликата – $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ [16].

Результаты количественного РФА портландцемента представлены на рисунке 4, цементного камня в возрасте 28 сут при твердении в нормальных условиях – на рисунке 5.

Бездобавочный цементный камень как продукт гидратации портландцемента представлен портландитом, продуктами его карбонизации – кальцитом и ватеритом, и гипсом, который является продуктом гидратации ангидрита. В цементном камне содержатся также негидратированные клинкерные компоненты в количестве $50,99 \pm 5,42\%$. Степень гидратации цемента к возрасту 28 сут составила примерно 49,01%. Как следует из данных рисунка 5, к возрасту 28 сут C_3A полностью прогидратировал, C_3S – на 60,9%, $\text{b-C}_2\text{S}$ – на 41,2% и $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ – на 26,8%. Гидратации целита не наблюдается. Продуктом гидратации силикатной составляющей цемента является также тоберморитоподобный гидросиликат C_2SH_2 , линии которого перекрываются на рентгенограммах линиями негидратированных минералов клинкера.

Для проведения количественного РФА использовались вышеописанные структурные данные клинкерных компонентов, а также кальцита и гипса. Кроме этого, использованы структурные данные для портландита (202233-ICSD) и ватерита (0019866-AMCSD) из American Mineralogist Crystal Structure

Database (URL:<http://www.rruf.geo.arizona.edu>).

Органоминеральные композиции «портландцемент–целлюлоза» представлены двумя составами. Состав 1 содержал 75 % мас. цемента и 25% мас. скопа, состав 2 – 25 % мас. цемента и 75% мас. скопа. Результаты количественного РФА цементного камня в составах органоминеральных композиций в возрасте

28 сут при твердении в нормальных условиях приведены на рисунках 6 и 7.

Процесс гидратации цемента в органоминеральной композиции состава 1 протекает несколько иначе, чем в бездобавочном цементном камне и следующим образом: продуктом гидратации C_3S и $b-C_2S$ является портландит, а продуктами его карбонизации – кальцит и

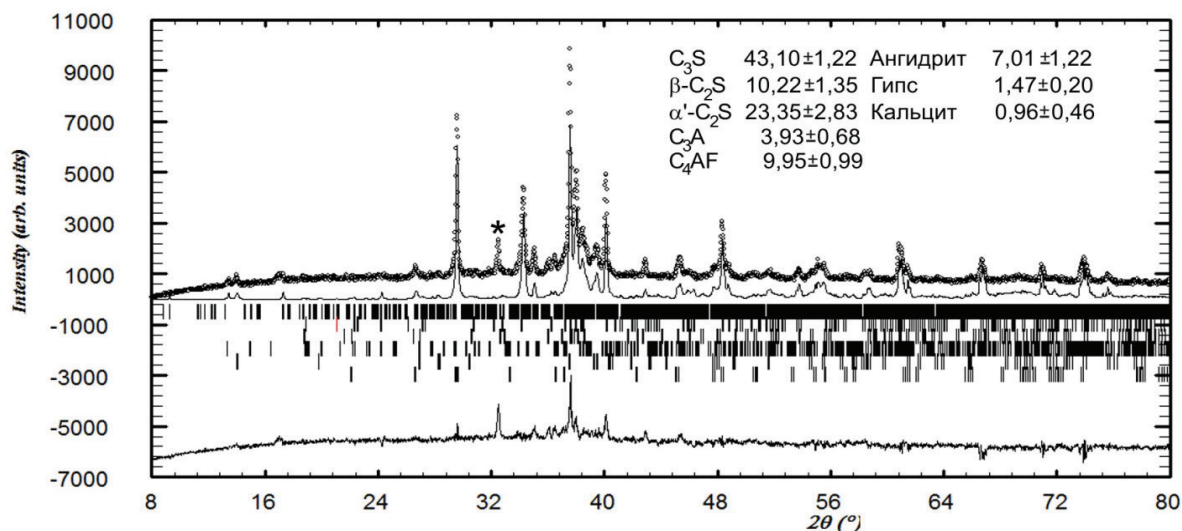


Рисунок 4 – Количественный рентгенофазовый анализ портландцемента. Звездочкой обозначено отражение от подложки препарата – кюветы из прессованной борной кислоты

Figure 4 – Quantitative X-ray analysis of portland cement

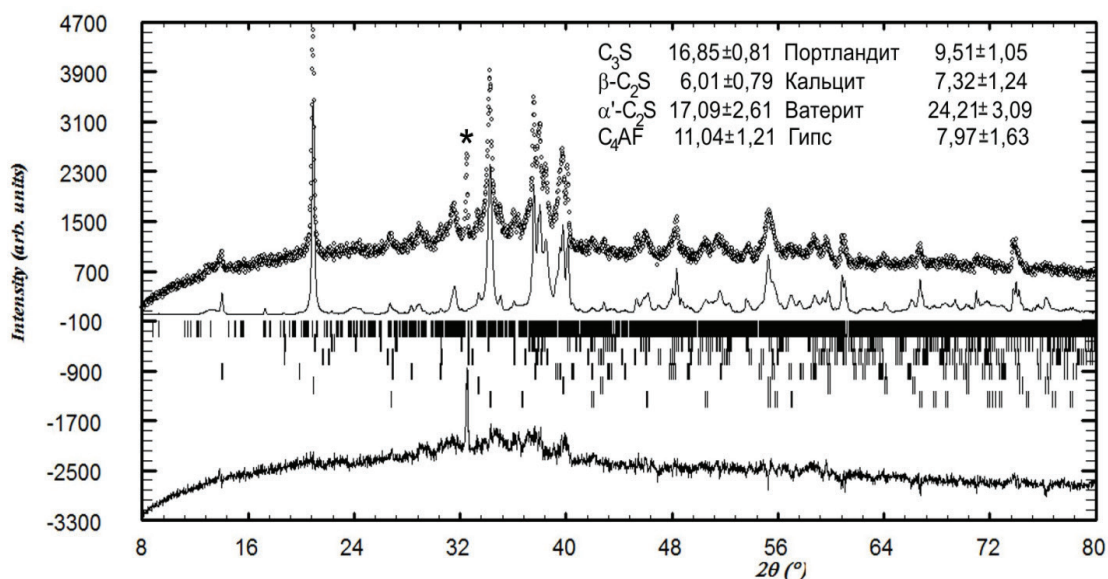


Рисунок 5 – Количественный рентгенофазовый анализ цементного камня в возрасте 28 сут. Звездочкой обозначено отражение от подложки препарата

Figure 5 – Quantitative X-ray analysis of the cement rock while 28 days. The sprocket wheel marks out reflex from a specimen emulsion carrier

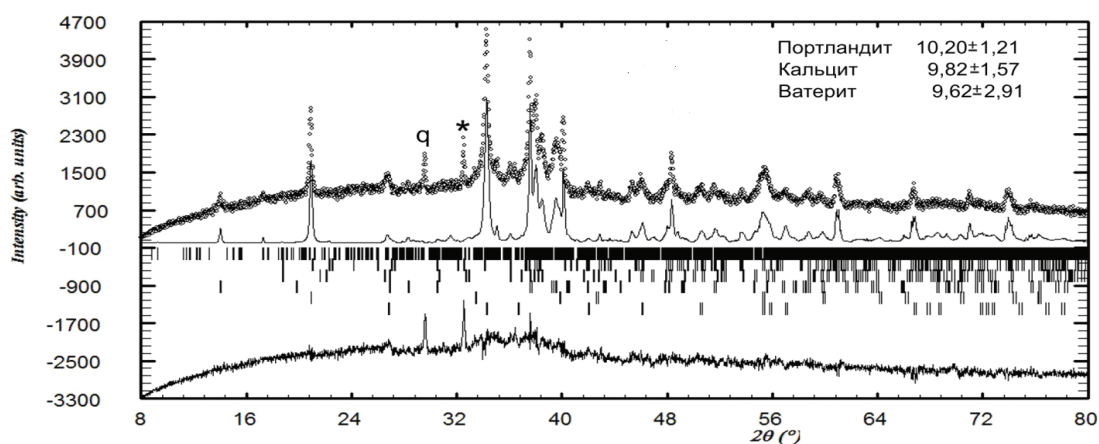


Рисунок 6 – Количественный рентгенофазовый анализ органоминеральной композиции состава 1, включающей 75 % мас. цемента и 25% мас скопа. Звездочкой обозначено отражение от подложки препарата

Figure 6 – Quantitative X-ray analysis of the 1 organic and mineral composition, 75 % mas. cement and 25 % mas. skop. By a sprocket wheel it is marked out reflex from a specimen emulsion carrier

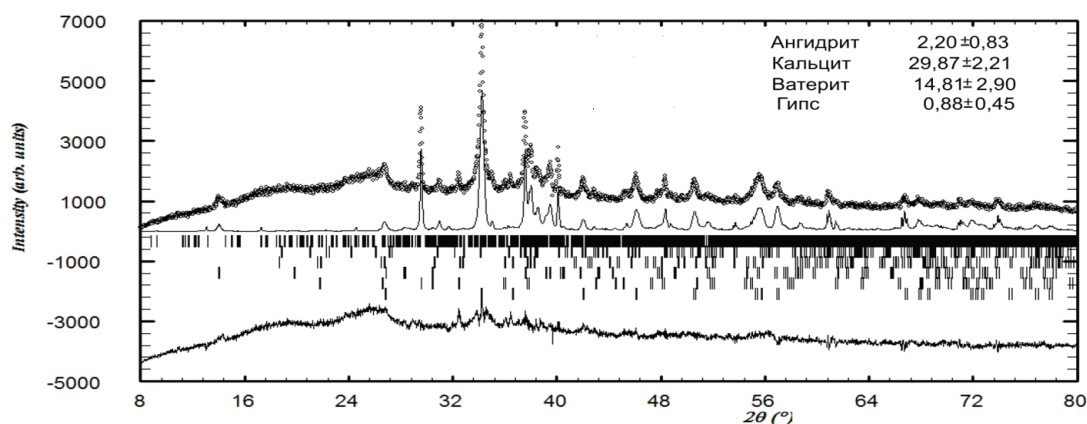


Рисунок 7 – Количественный рентгенофазовый анализ органоминеральной композиции состава 2, включающей 25 % мас. цемента и 75% мас скопа. Звездочкой обозначено отражение от подложки препарата

Figure 7 – Quantitative X-ray analysis of the 2 organic and mineral composition, 25 % mas. cement and 75 % mas. skop. By a sprocket wheel it is marked out reflex from a specimen emulsion carrier

ватерит (см. рисунок 6). Содержание негидратированных клинкерных минералов в цементном камне составляет $52,25 \pm 6,41\%$, степень гидратации цемента – $47,75 \pm 6,41\%$. При этом полностью гидратирует быстротвердеющий C_3A , C_3S гидратирует на $60,46\%$, $b-C_2S$ – на $46,47\%$, $\alpha'-C_2S$ – на $35,03\%$.

Гидратация цемента в органоминеральной композиции состава 2 протекает значительно медленнее, чем в бездобавочном цементном камне и в органоминеральной композиции состава 1. Это выражается в образовании ангидрита, кальцита, ватерита, гипса и отсутствии портландита, а также иной концентрации непрореагировавших с водой клинкерных минералов.

Содержание негидратированных клинкерных минералов в цементном камне составляет $69,53 \pm 6,72\%$, а степень гидратации цемента $30,47 \pm 6,72\%$. Полностью гидратирует C_3A , C_3S на – $39,9\%$, $b-C_2S$ – на $41,2\%$, гидратации $\alpha'-C_2S$ и C_4AF не наблюдается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минеральный состав затвердевшей органоминеральной композиции состава 1 и бездобавочного цементного камня отличаются. Из полученных количественных данных следует, что имеет место процесс торможения гидратации. Это проявилось в различных концентрациях продуктов гидратации, негидратированных клинкерных минералов и степени гидратации цемента.

Еще более интересная картина гидратационных процессов обнаружилась в затвердевшей органоминеральной композиции состава 2. На рентгенограмме этой композиции, показанной на рисунке 7, отсутствуют отражения портландита как естественного продукта гидратации высококальциевых ортосиликатов – C_3S и $b-C_2S$. При этом в достаточном количестве присутствуют продукты его карбонизации – кальцит и ватерит. Для цементного камня характерны высокое содержание негидратированных клинкерных минералов и низкая степень гидратации цемента. Увеличение содержания скопа в органоминеральной композиции состава 2 до 75% мас. способствует замедлению процессов гидратации цемента вследствие экранирования зерен цемента органической составляющей скопа.

На основании полученных результатов рентгеновских исследований можно сделать вывод, что введение в цемент скопа с достаточно высокой концентрацией реакци-

онно-активной аморфной фазы целлюлозы способствует торможению гидратационных процессов. Замедление гидратационных процессов приводит к уменьшению содержания кристаллических фаз и образованию аморфно-кристаллической структуры, которая присуща гидросиликатам [17, 18].

Кроме этого, присутствие целлюлозы в твердеющей органоминеральной композиции приводит к определенным отличиям в реализации процессов карбонизации портландита (рисунок 8). При уменьшении количества цемента в составе органоминеральной композиции от 75 до 25% по массе (соответственно увеличению количества скопа от 25 до 75% мас.) наблюдается постепенное изменение фазового состава цементного камня. Результатом такого изменения является значительное увеличение количества кальцита, небольшое – ватерита и существенное уменьшение содержания портландита.

Обнаружение в затвердевшем составе 2 небольших количеств ангидрита и гипса, по-видимому, может являться следствием влияния слабокислотной природы целлюлозы на процессы их диссоциации.

Следует полагать, что для снижения отмеченного негативного влияния целлюлозы на гидратационное фазообразование цементного камня в органоминеральных композициях, предпочтительно использование слабо-реакционной целлюлозы. Это возможно при направленном повышении степени ее кристалличности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ является универсальным применительно к исследованию композиционных материалов, состоящих из органических и неорганических компонентов. Он позволил детально исследовать техногенный продукт скоп, портландцемент и органоминеральные композиции на их основе, обеспечивая при этом качественную идентификацию фаз и определение количественного фазового состава цементного камня в органоминеральных композициях.

На основе рентгенографических данных установлены фазовый состав минеральных примесей скопа и степень кристалличности целлюлозы, определяющая ее реакционную способность. Волокна целлюлозы, составляющие основную массу вещества скопа, достаточно активны, что определяет высокую адгезию продуктов гидратации цементного вяжущего к их поверхности, и будет способ-

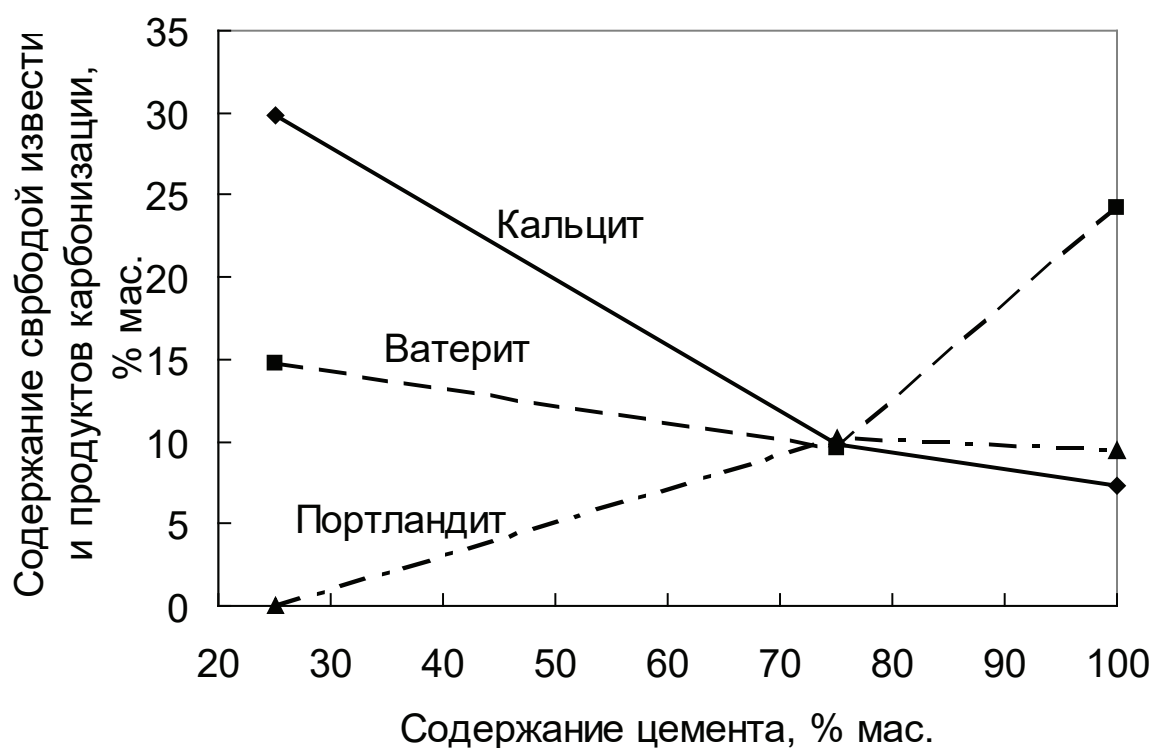


Рисунок 8 – Зависимость содержания портландита и продуктов его карбонизации от содержания цемента в органо-минеральной композиции

Figure 8 – Dependence of the content portlandit and carbonisation from the cement content in organic and mineral compositions

ствовать повышению пределов прочности на растяжение и изгиб органо-минеральных композиций.

Изучение процессов структурообразования цементного камня методом количественного рентгенофазового анализа показало, что при введении скопа как заполнителя в органо-минеральную композицию имеет место тенденция торможения процессов гидратации цемента. Некоторые отличия в составе и структуре цементного камня по сравнению с бездобавочным цементным камнем наблюдаются при 25%-ном содержании скопа в органо-минеральной композиции, связанные со значительным уменьшением количества ватерита. При введении в органо-минеральную композицию скопа в количестве 75% по массе установлены значительные изменения в составе и струк-

туре цементного камня по сравнению с фазовым составом цементного камня без введения органического заполнителя. Эти изменения обусловлены отсутствием на рентгенограммах портландита, уменьшением количества ватерита и увеличением продукта карбонизации портландита – кальцита в твердеющей органо-минеральной композиции. Замедление гидратационных процессов цемента в составе органо-минеральных композиций приводит к уменьшению содержания кристаллических фаз и образованию аморфно-кристаллической структуры, присущей гидросиликатам кальция.

Следовательно, эффективная совместная работа армирующего компонента скопа с цементной матрицей возможна при лимитированном количестве скопа в органо-минераль-

ных композициях. Рациональное содержание скопа следует устанавливать по результатам физико-химических и физико-механических испытаний композиционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Batalin B.S., Kozlov I.A. Foamed concrete with wastes of pulp and paper industry. Role for concrete in global development: Proceeding of the International Conference. Dundee: University of Dundee. Scotland. UK. 8 – 9 July 2008. Pp. 419 – 426.

2. Баталин Б.С., Козлов И.А. Строительные материалы на основе скопа – отхода целлюлозно-бумажной промышленности // Строительные материалы. 2004. № 1. С. 42 – 43.

3. Козлов И.А. Исследование физико-механических свойств скопа картонного производства / И.А. Козлов, Б.С. Баталин // Известия вузов. Строительство. 2005. № 1. С. 32 – 34.

4. Пичугин А.П., Денисов А.С., Хританков В.Ф. [и др.] Эффективные органоминеральные бетоны с повышенными тепло- и звукоизолирующими свойствами // Строительные материалы. 2008. № 5. С. 73 – 75.

5. Матвеева З.О. Использование осадков сточных вод в производстве керамзита // Бумажная промышленность. 1980. № 3. С. 24.

6. Матвеева З.О. Использование отходов целлюлозно-бумажной промышленности для производства аглопоритового гравия // Строительные материалы. 1980. № 6. С. 21 – 22.

7. Ольков П.Л. Улучшение качества керамзита путём устранения слипания сырцовых гранул в процессе сушки // Строительные материалы. 1980. № 5. С. 16 – 17.

8. Щекина Н.С. Теплоизоляционные материалы из отходов картонной фабрики // Строительные материалы. 1984. № 2. С. 19 – 20.

9. Финкельштейн Г.Э. Актуальные задачи совершенствования испытаний целлюлозно-бумажной продукции // Бумажная промышленность. 1983. № 10. С. 21 – 22.

10. Козлов И.А., Баталин Б.С. Исследование адгезионных свойств скопа целлюлозно-бумажных комбинатов // Известия вузов. Строительство. 2005. № 3. С. 42 – 44.

11. Баталин Б.С., Козлов И.А. Скоп как сорбционно-активное вещество // Известия вузов. Строительство. 2006. № 2. С. 37.

12. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization. Journal of Applied Crystallography. 2004. 37. P. 743 – 749.

13. Голязимова О.В., Политов А.А., Ломов-

ский О.И. Механическая активация ферментативного гидролиза лигноцеллюлозы // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 59 – 63.

14. Кочева Л.С., Броварова О.В., Секушин Н.А., Карманов А.П., Кузьмин Д.В. Структурно-химическая характеристика недревесных видов целлюлозы // Лесной журнал. 2005. № 5. С. 86 – 93.

15. Segal L., Creely J.J., Martin A.E. and Conrad C.M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. 1959. Textile Res. J. 29: P. 786 – 794.

16. Чижов П.С. Прецезионный рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ клинкеров российских цементных заводов // Цемент и его применение. 2012. № 3. С. 66 – 69.

17. Pelleng R.J., Kushima A., Shahsavari R., van Vliet K.L., Buehler M.J., Yip S., Ulm F.-J. A realistic model of cement hydrates. National Academy of Science. Proceedings, Washington., 2009. v.106,38. P. 16102 – 16107.

18. Бикбай М.Я. Атомная структура и механизм полиморфных превращений трехкальциевого силиката // Цемент и его применение, 2006. № 4. С. 71–76.

REFERENCES

1. Batalin B.S., Kozlov I.A. Foamed concrete with wastes of pulp and paper industry. Role for concrete in global development: Proceeding of the International Conference. Dundee: University of Dundee, Scotland, UK, 8 – 9 July 2008, pp. 419 – 426.

2. Batalin B.S., Kozlov I.A. Stroitel'nye materialy na osnove skopa – otkhoda tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti [Construction of the saw trestles materials on a ground skop – a pulp and paper industry withdrawal]. *Stropil'nye materialy*. 2004; 1: 42–43 (in Russian).

3. Kozlov I.A., Batalin B.S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv skopa kartonnogo proizvodstva [Research of physicomechanical properties skop cardboard production]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2005; 1: 32–34 (in Russian).

4. Pichjugin A.P., Denisov V.F., Khritankov V.F. [i dr.] Effektivnye organomineral'nye betony s povyshennymi teplo- i zvukoizoliruyushchimi svoystvami [Effective organic and mineral betons with the raised warmly- and sound insulating properties]. *Stropil'nye materialy*. 2008; 5: 73–75 (in Russian).

5. Matveeva Z.O. Ispol'zovanie osadkov stochnykh vod v proizvodstve keramzita [Usage

of sediments of sewage in haydite production]. *Bumazhnaya promyshlennost'*. 1980; 3: 24 (in Russian).

6. Matveeva Z.O. Ispol'zovanie otchodov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti dlya proizvodstva agloporitovogo graviya [Usage of the pulp waste and paper industry for production agloporit gravel]. *Stropil'nye materialy*. 1980; 3: 21–22 (in Russian).

7. Ol'kov P.L. Uluchshenie kachestva keramzita putem ustraneniya slipaniya syrtsovykh granul v protsesse sushki [Martempering of quality of haidite by adhesion elimination of the crude pellets in the course of drying]. *Stropil'nye materialy*. 1980; 5: 16–17 (in Russian).

8. Shchekina N.S. Teploizolyatsionnye materialy iz otkhodov kartonnoj fabriki [Thermal insulation materials from waste metal of cardboard plant]. *Stropil'nye materialy*. 1984; 2: 19–20 (in Russian).

9. Finkel'shteyn G.E. Aktual'nye zadachi sovershenstvovaniya ispytaniy tsellyulozno-bumazhnoy produktcii [Actual problems of trials perfection of the pulp and paper commodity]. *Bumazhnaya promyshlennost'*. 1983; 10: 21 – 22 (in Russian).

10. Kozlov I.A., Batalin B.S. Issledovanie adgezionnykh svoystv skopa tsellyulozno-bumazhnykh kombinatov [Study of adhesive properties skop pulp-and-paper integrated works]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2005; 3: 42–44 (in Russian).

11. Batalin B.S., Kozlov I.A. Skop kak sorbtionno-aktivnoe veshchestvo [Skop as sorbtionno-active material]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2006; 3: 37 (in Russian).

12. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization. *Journal of Applied Crystallography*. 2004. 37. P. 743 – 749.

13. Golyazimova O.V., Politov A.A., Lomovsrij O.N. Mekhanicheskaya aktivatsiya fermentativnogo gidroliza lignotsellyulozy [Mechanical activation enzyme of the lignocellulose hydrolysis]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2009; 2: 59 – 63 (in Russian).

14. Kocheva L.S., Brovarova O.V., Sekushin N.A., Karmanov A.P., Kuz'min D.V. Strukturno-khimicheskaya kharakteristira nedrevesnykh vidov tsellyulozy [Structurally-chemical performance of non woody sorts of cellulose]. *Lesnoj zhurnal*. 2005; 5: 86 – 93 (in Russian).

15. Segal L., Creely J.J., Martin A.E. and Conrad C.M. Anempirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. 1959. *Textile Res. J.* 29: P. 786 – 794.

16. Chizhov P.S. Pretseziionnyj rentgeno-fazovyj i rentgenostrukturnyj analiz klinkerov rossijskikh tsementnykh zavodov [X-ray phase and X-ray crystal analysis of clinkers of the Russian cement works]. *Tsement i ego primenenie*. 2012; 3: 66 – 69 (in Russian).

17. Pelleng R.J., Kushima A., Shahsavari R., van Vliet K.L., Buehler M.J., Yip S., Ulm F.-J. A realistic model of cement hydrates. *National Academy of Science. Proceedings*, Washington., 2009. v.106, 38. P. 16102–16107.

18. Bikbau M.Ya. Atomnaya struktura i mekhanizm polimorfnykh prevrashcheniy trekhkal'tsievogo silikata [Atomic pattern and the gear of polymorphic transformations of three-calcium silicate]. *Tsement i ego primenenie*. 2006; 4: 71 – 76 (in Russian).

Поступила 12.04.2019, принята к публикации 27.08.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительные материалы и специальные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», ORCID ID 0000-0003-4451-2297 (644080, г. Омск, e-mail: le5@inbox.ru, chulkova_il@sibadi.org).

Селиванов Игорь Алексеевич – инженер, директор ООО «Проектвенстрой», Пермский край, г. Очер, e-mail: igoralk@rambler.ru.

Галдина Вера Дмитриевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы и специальные технологии» Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (г. Омск, e-mail: ver.galdina@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina L. Chulkova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Materials and Special Technologies, Siberian Automobile and Highway University,

ORCID ID 0000-0003-4451-2297 (Omsk, e-mail: le5@inbox.ru, chulkova_il@sibadi.org).

Igor A. Selivanov – Engineer, Director of the «Proektvenstroy» Company (Perm, Ocher, e-mail: igoralk@rambler.ru).

Vera D. Galdina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials and Special Technologies, Siberian Automobile and Highway University (Omsk, e-mail: ver.galdina@yandex.ru).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1. УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10–12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 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 A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисункной 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 – подрисункные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;

- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректурa статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.

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>