

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

## **ВЕСТНИК СИБАДИ**

# **THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL**

**Том 16, № 5. 2019. Сквозной номер выпуска – 69  
(Vol. 16, no. 5. 2019. Continuous issue – 69)**

**Омск – 2019**

Главный редактор **Жигadlo 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

**Корьтов 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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Немировский Ю.В.**, д-р физ.-мат. наук, проф. 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

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

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

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

## EDITORIAL 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, Bialystok, Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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. Chekarovskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State budget institution of higher education «Tyumen industrial University», Tyumen, Russia

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

**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](http://vestnik.sibadi.org); e-mail: [vestnik\\_sibadi@sibadi.org](mailto:vestnik_sibadi@sibadi.org)

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), регистрационный номер СМИ ПИ № ФС 77-73591 от 31.08. 2018 года.

Научный рецензируемый журнал Вестник СибАДИ / The Russian Automobile and Highway Industry Journal входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК решением президиума ВАК от 25.02.2011 г.; В соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90-р включен в новый перечень. С 2009 года представлен в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU и включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Входит в международный каталог Ulrich's International Periodicals Directory. Подписной индекс 66000 в каталоге (АО Агентства "РОСПЕЧАТЬ"). С 2017 г. всем номерам и статьям журнала присваиваются идентификаторы цифровых объектов (DOI), данные о которых размещены в электронной версии на сайте [vestnik.sibadi.org](http://vestnik.sibadi.org). Редакционный блок осуществляет экспертную оценку, рецензирование и проверку статей на плагиат.

Подписано в печать 25.10.2019. Дата выхода в свет 30.10.2019. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии ИПК ФГБОУ ВО «СибАДИ» 644080, г. Омск, пр. Мира, 5.

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2019

## РАЗДЕЛ I.

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*М.С. Корытов, В.С. Щербаков, В.Е. Беляков*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА,  
ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗОПОДЪЕМНЫМ КРАНОМ .....526**

*В.Е. Овсянников, В.И. Васильев*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕМОНТНОМ РАСТАЧИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ  
СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН .....534**

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

*С.А. Аземша*

**РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
ОБЩЕСТВЕННОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА .....544**

*А.В. Белякова, Б.В. Савельев*

**АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (ОБЗОР).....558**

*Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский*

**УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТА ТЯГОВОЙ МОЩНОСТИ АВТОМОБИЛЯ.....572**

*А.А. Маркина, С.Н. Чепкасов, М.А. Бережная*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОЛНОУПРАВЛЯЕМОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ .....580**

*А.В. Пузак*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО  
ЭЛЕКТРОБЕНЗОНАСОСА .....592**

## РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Т.В. Боброва, А.А. Андриюшенков*

**ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДОРОЖНОЙ СЕТЬЮ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ .....606**

*И.С. Пуляев, С.М. Пуляев*

**ОПЫТ НАУЧНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ «КАЧЕСТВО» .....618**

## PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

*M.S. Korytov, V.S. Shcherbakov, V.E. Belyakov*

**FLUCTUATIONS OF THE CARGO TRANSPORTED BY LIFTING CRANE: SIMULATION AND ANALYSIS.....527**

*V.E. Ovsyannikov, V.I. Vasilyev*

**DETAILS' REPAIR OF CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES: FLUCTUATIONS' MODELLING.....535**

## PART II. TRANSPORT

*S.A. Azemsha*

**DEVELOPMENT OF PROPOSALS TO IMPROVE THE EFFICIENCY  
OF PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT.....545**

*A.V. Belyakova, B.V. Saveliev*

**SIMULATORS FOR TRAINING OF VEHICLES' DRIVERS: INFORMATION MODELS' ANALYSIS (REVIEW).....559**

*E.A. Maksimov, E.P. Ustinovskiy*

**REFINING THE CALCULATION OF THE CAR TRACTION POWER.....573**

*A.A. Markina, S.N. Chepkasov, M.A. Berezhnaya*

**KINEMATIC STUDY OF THE FOUR-WHEELED STEERING SYSTEM .....581**

*A.V. Puzakov*

**AUTOMOTIVE ELECTRIC FUEL PUMP'S FAULTS: RESULTS OF THE PHYSICAL MODELING.....593**

## PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

*T.V. Bobrova, A.A. Andryushenkov*

**MANAGING THE ROAD NETWORK OF URBAN AGGLOMERATION:  
FORMATION OF THE INFORMATION MODELING .....607**

*I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev*

**OBJECTS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE: EXPERIENCE OF SCIENTIFIC SUPPORT  
IN CONSTRUCTION WITHIN THE "QUALITY" CONCEPT IMPLEMENTATION.....619**

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

УДК 621.86

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА, ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗОПОДЪЕМНЫМ КРАНОМ

*\*М.С. Корытов<sup>1</sup>, В.С. Щербаков<sup>1</sup>, В.Е. Беляков<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ»,*

*г. Омск, Россия,*

*<sup>2</sup>Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии*

*А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации,*

*г. Омск, Россия*

*\*kms142@mail.ru*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Уменьшение колебаний груза, перемещаемого грузоподъемными кранами с гибким канатным подвесом груза, является актуальной задачей, поскольку позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое на выполнение рабочей операции перемещения груза. Перспективным направлением уменьшения колебаний груза, позволяющим обойтись без усложнения конструкции грузоподъемного крана, является оптимизация траектории перемещения верхней точки подвеса груза.

**Материалы и методы.** В статье рассматривается способ имитационного математического моделирования плоских колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном с горизонтально перемещающейся точкой подвеса, при помощи программных средств системы MATLAB. Для моделирования использована функция системы MATLAB ode45, предназначенная для численного решения систем нестационарных дифференциальных уравнений произвольного порядка. Приводится дифференциальное уравнение второго порядка, используемое для описания колебаний перемещаемого груза, и его реализация в виде программного кода. Даются элементы программного кода для анализа и визуализации результатов моделирования.

**Результаты.** В качестве примера в статье приведен ряд графиков изменения с течением времени угла наклона грузового каната, ускорения точки подвеса, значения целевой функции при синусоидальном характере ускорения точки подвеса. Целевая функция представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения каната и его первой производной в конечный момент времени движения точки подвеса с ускорением.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что при симметричном характере разгона и торможения точки подвеса система с диссипацией энергии не достигает нулевого значения целевой функции. Необходимо придать асимметричность периодам разгона и торможения точки подвеса, для того чтобы полностью погасить остаточные колебания груза.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** груз, колебания, маятник, канат, грузоподъемный кран, гашение колебаний, точка подвеса.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение анонимному рецензенту, работавшему с данной статьей.

© М.С. Корытов, В.С. Щербаков, В.Е. Беляков



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# FLUCTUATIONS OF THE CARGO TRANSPORTED BY LIFTING CRANE: SIMULATION AND ANALYSIS

M.S. Korytov<sup>1</sup>, V.S. Shcherbakov<sup>1</sup>, V.E. Belyakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Automobile and Highway University,  
Omsk, Russia

<sup>2</sup> Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Krulev,  
Omsk, Russia

\*kms142@mail.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** Reducing fluctuations in the load transported by hoisting cranes with a flexible rope suspension of the load is an urgent task since it can significantly reduce the time taken to complete the operation of moving the load. A promising direction for reducing load fluctuations is to optimize the trajectory of movement of the load suspension upper point.

**Materials and methods.** The paper discussed the method of mathematical simulation of plane vibrations of a load moved by a crane with a horizontally moving suspension point, using the software of the MATLAB system. For modeling, the authors used the function of the MATLAB ode45 system, intended for the numerical solution of systems of non-stationary differential equations of arbitrary order. The second-order differential equation used to describe the fluctuations of the transported load and its implementation in the form of program code was presented. Moreover, the authors demonstrated the elements of program code for the analysis and visualization of simulation results.

**Results.** The authors obtained and presented the series of graphs in the inclination angle's changing of the cargo rope, the acceleration of the suspension point and the value of the objective function with the sinusoidal nature of the acceleration. The objective function was the sum of the absolute values of the deflection angle of the rope and the first derivative at the final moment of the suspension point's movement with acceleration.

**Discussion and conclusions.** As a result, the paper shows that the system with energy dissipation does not reach the zero value of the objective function even by a symmetrical nature of acceleration and deceleration of the suspension point. Therefore, it is necessary to give asymmetry to the acceleration and deceleration periods of the suspension point in order to completely absorb the residual fluctuations of the load.

**KEYWORDS:** load, vibrations, pendulum, rope, crane, damping, suspension point.

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The authors express their gratitude to the reviewers for the opinions and suggestions.

© M.S. Korytov, V.S. Shcherbakov, V.E. Belyakov



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

## ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны (ГК) – основное средство механизации погрузочно-разгрузочных работ в строительстве [1], в черной и цветной металлургии [2], в портах и логистических центрах [3], на железнодорожном транспорте. Их основной задачей является захват груза с помощью грузозахватного устройства, его подъем, перемещение на заданное расстояние и опускание в целевую точку [4].

Как механическая динамическая система, состоящая из отдельных звеньев, ГК может быть описан с помощью дифференциальных уравнений (ДУ) [5]. Одна из основных и до конца не решенных в настоящее время проблем, связанных с использованием ГК с нежестким подвесом груза, – неуправляемые колебания последнего в горизонтальном и вертикальном направлениях [6, 7]. Горизонтальные колебания груза на порядок превышают вертикальные и возникают при любом перемещении верхней точки подвеса груза в горизонтальной плоскости [8].

Улучшить работу, эффективность и безопасность ГК возможно при активном подавлении горизонтальных колебаний груза вместе с грузозахватным приспособлением [9]. Это позволяет существенно сократить время рабочего цикла ГК [10].

Нелинейность и сложная динамика усложняют перемещение грузозахватного приспособления с грузом в определенную точку пространства, поэтому хорошо продуманный подавляющий колебания процесс управления ГК позволяет выйти на режим и поддерживать в нем малый диапазон раскачивания груза либо полностью подавить неуправляемые колебания. Таким способом будет повышена эффективность работы ГК при одновременном снижении энергопотребления в приводах [11].

В реальной работе грузозахватное приспособление ГК имеет большой ход, поэтому процесс управления в основном включает три этапа: этап ускорения и устранения раскачиваний груза, этап равномерного движения и этап замедления и устранения раскачиваний груза. Среди них стадия ускорения и устранения раскачиваний груза является наиболее сложной частью управления грузозахватным приспособлением ГК. Существует ряд распространенных методов контроля положения грузозахватного приспособления и груза ГК [12], основные из них заключаются в рациональном планировании траектории движения, чтобы перемещения рабочего оборудования ГК могли подавлять раскачивание груза [13]. Разноо-

бразны и методы измерения величин, необходимых для работы системы управления. Так, в статье [14] для измерения угла наклона грузового каната с грузом в процессе управления предлагается использовать звуковые сигналы.

Проблема возникновения неуправляемых колебаний характерна для всех видов ГК с канатным подвесом груза, в том числе для мостовых ГК [15] и для башенных ГК [16]. Для ее решения, помимо традиционных подходов, таких как использование ПИД-регуляторов [17], применяются самые разные подходы, в частности и достаточно нестандартные: нечеткие системы управления [18], эволюционные алгоритмы [19] и т.д.

Большинство методов контроля положения грузозахватного приспособления и груза ГК для проверки их работоспособности и эффективности могут использовать различные математические модели объекта, включая имитационные [20]. Однако при всех своих преимуществах имитационные математические модели сравнительно сложны и ресурсоемки.

В настоящей работе представлена менее ресурсоемкая математическая модель, основанная на непосредственном решении системы ДУ, описывающих динамику больших угловых колебаний груза ГК в отдельной плоскости. Пространственные колебания груза при углах отклонения каната от гравитационной вертикали менее  $5^\circ$  могут быть с достаточной точностью описаны как суперпозиция плоских колебаний [7, 20].

Для разработки данной математической модели необходимо выбрать вид ДУ, описывающего исследуемые движения динамической системы ГК с достаточной степенью детализации, представить данное ДУ в форме Коши, допускающее его решение численными методами, составить программный код для решения и произвести его отладку. Для подтверждения работоспособности математической модели необходимо представить примеры результатов ее использования.

Важность проведенного исследования обусловлена тем, что математические модели, в том числе представленная в данной статье, могут быть использованы для описания поведения объекта, т.е. ГК, при любом из описанных выше подходов к решению задачи подавления неуправляемых колебаний груза.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрена маятниковая колебательная система в виде груза массой  $m$ , подвешенного на нерастяжимой нити постоянной длины  $L$ .

Верхняя точка подвеса маятника подвижна, ее ускорение в горизонтальном направлении вдоль оси  $x$  обозначено  $\ddot{x}$ . Учтена диссипация энергии угловых колебаний, описанная приведенным к угловой координате маятника  $q$  коэффициентом диссипации энергии  $B$ , Н·м·с/рад.

Для случая больших углов отклонений грузового каната от гравитационной вертикали ДУ второго порядка, описывающего динамику системы, имеет вид [7, 20]:

$$\ddot{q} + \frac{2b}{m}\dot{q} + \frac{g}{L}\sin(q) + \frac{\ddot{x}}{L}\cos(q) = 0 \quad (1)$$

Здесь и далее точками над символами обозначены производные параметров по времени. Система ДУ (1) с достаточной степенью детализации показывает колебания груза, перемещаемого ГК, в отдельной плоскости пространства [7, 20]. При принятии допущения о постоянстве длины грузового каната при горизонтальных перемещениях груза рассматривался основной, занимающий наибольшее время этап перемещения груза после его подъема. Использование ДУ (1) предполагает допущение о том, что влияние массы груза на ускорение точки подвеса пренебрежимо мало (система ГК мало нагружена).

Для решения ДУ (1) численными методами необходимо представить его в форме Коши [5]. Введем новую переменную  $\omega$  для производной угла первого порядка, тогда ДУ (1) примет вид системы из двух ДУ первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{q} = \omega; \\ \dot{\omega} = -\frac{2b}{m}\omega - \frac{g}{L}\sin(q) - \frac{\ddot{x}}{L}\cos(q). \end{cases} \quad (2)$$

Для численного решения системы ДУ (2) использовалась функции `ode45` языка программирования системы MATLAB. Формат вызова процедуры решателя при помощи данной функции в системе MATLAB имел вид

$$[T, Y] = \text{ode45}(\text{fun}, [0, T_{\text{кон}}], [0 \ 0]),$$

где  $[0, T_{\text{кон}}]$  – вектор из двух значений начального и конечного времени моделирования;  $[0 \ 0]$  – вектор из двух нулевых начальных значений переменных  $\omega$  и  $q$  в начальный (нулевой) момент времени; `fun` – название (в данном случае т.н. «маска») функции, где вычисляются правые части системы ДУ (2);  $T$  – вектор значений времени для массива решений  $Y$  (значений переменных  $\omega$  и  $q$  в данном случае).

Файл-функция с названием `func1`, описывающая правые части системы ДУ в форме Коши, имела вид

```
function dy = func1(t,y,B,L,A,k) % Название
dy = zeros(2,1);
g=9.81; % Ускорение свободного падения
dy(1)=-B*y(1)-g*sin(y(2)/L-A*sin(k*t)*cos(y(2)/L);
% Правые части системы ДУ
dy(2) = y(1);
end
```

В ней в качестве примера, демонстрирующего работоспособность математической модели, воздействие со стороны привода ГК, т.е. ускорение подвеса в горизонтальном направлении вдоль оси  $x$  задавалось в виде синусоиды

$$\ddot{x} = A \cdot \sin(k \cdot t), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда ускорения точки подвеса;  $k$  – коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса.

В данной функции, помимо времени  $t$  и вектора  $y$  из двух переменных ДУ  $\omega$  и  $q$ , в качестве входных параметров выступает коэффициент диссипации энергии  $B$ , длина грузового каната  $L$ , амплитуда ускорения точки подвеса  $A$  и коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса  $k$ .

Функция `func1` вычисления правых частей системы ДУ имеет 6 входных параметров, из которых один векторный, остальные скалярные, в то время как функция численного решения системы ДУ языка программирования MATLAB предусматривает только два входных параметра вызываемой функции вычисления правых частей системы ДУ: время и вектор переменных систем ДУ. Напрямую использовать функцию `func1` в строке вызова решателя `ode45` невозможно.

Для обхода этого ограничения был использован аппарат анонимных функций.

В строке основной программы, предшествующей вызову решателя `ode45`, описывалась анонимная функция `fun` аргументов  $t$  и  $y$ , которая «маскирует» функцию 6 аргументов `func1`, приведенную выше:

$$\text{fun} = @(t,y) \text{func1}(t,y,B,L,A,k).$$

При вызове в строке с `ode45` функции `fun` требования решателя `ode45` выполняются.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования влияния времени движения системы точки подвеса с грузом с ускорением коэффициент задания периода колебаний ускорения точки подвеса  $k$  варьировался от 0.1 до 0.2 с шагом 0.0001 в цикле:

```
for k = 0.1:0.0001:0.2
    Tkon = (2*pi)/k;
    .....
end
```

Конечное время моделирования задавалось по зависимости

$$T_{kon} = \frac{2\pi}{k},$$

которая при использовании синусоиды (3) в качестве функции ускорения подвеса обеспечивает нулевое значение ускорения (выход на установившийся режим движения либо полную остановку) грузовой тележки ГК в конечный момент рассматриваемого процесса.

Прочие параметры модели принимали значения:  $b = 0.5$ ;  $m = 100$ ;  $L = 10$ ;  $A = 0.1$ .

Минимизируемая функция  $F$  вычислялась по зависимости

$$F = |q(T_{kon})| + |\dot{q}(T_{kon})|. \quad (4)$$

Соответствующие строки программного кода для вычисления функции (4) имели вид

```
Nkon = length(Y(:,1));
```

$$CF(i) = \text{abs}(Y(\text{nkon},1)) + \text{abs}(Y(\text{nkon},2)).$$

На рисунке 1 а, в приведены временные зависимости угла  $q$  наклона грузового каната ГК и его первой производной (а) и функции  $F$  (в) при  $k = 0.1$ . На рисунке 1, б, г приведены аналогичные зависимости при оптимальном значении  $k = 0.1419$ .

Было установлено, что даже при оптимальном значении  $k = 0.1419$  симметричная форма функции (3) ускорения точки подвеса груза на ГК не позволяет полностью устранить остаточные колебания грузового каната и груза после окончания периода ускорения (см. рисунок 1, б, г).

Поэтому была исследована также несимметричная форма функции ускорения точки подвеса при прочих равных условиях (рисунок 2, е):

$$\ddot{x} = A \cdot (1 - k_1 \cdot t) \cdot \sin(k \cdot t), \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент приращения (уменьшения) ускорения. При  $k_1 = 0$  функция (5) становится тождественна симметричной функции (3).

В результате было установлено, что при оптимальном значении  $k_1 = 0.0045$  значение целевой функции может быть снижено до нуля при  $k = 0.1418$  (рисунок 2, д).

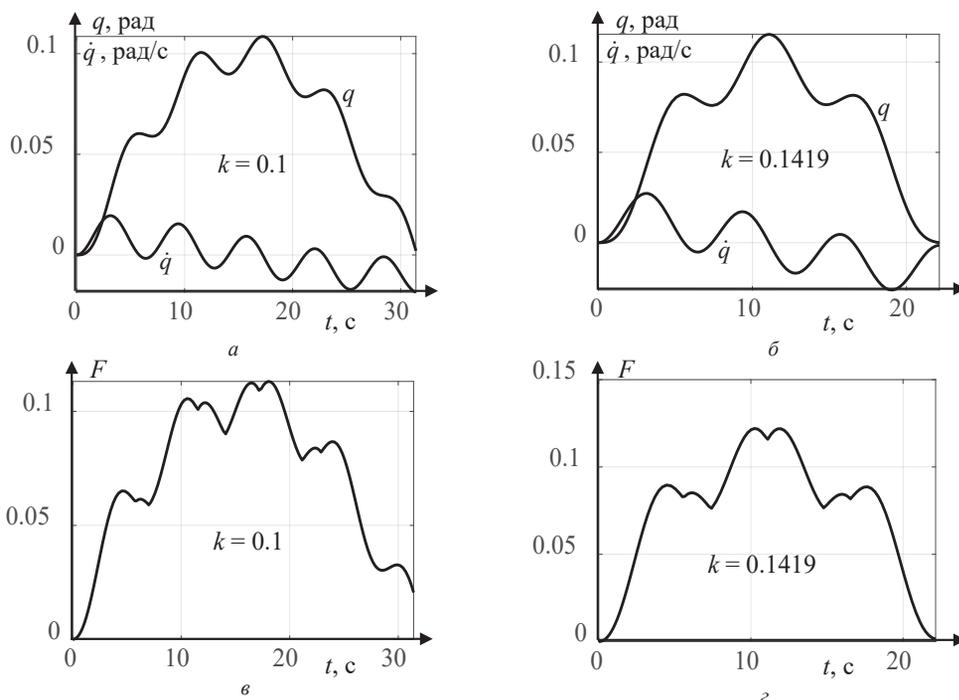


Рисунок 1 – Временные зависимости угла  $q$  наклона грузового каната ГК и его первой производной (а, б), а также целевой минимизируемой функции  $F$  (в, г) (пример)

Figure 1 – Time dependences of the  $q$  tilt angle of the cargo rope of the main cargo ship and its first derivative (a, b), as well as the target minimized function  $F$  (c, d) (example)

**ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработан способ математического моделирования колебаний груза ГК мостового типа, у которого точка подвеса совершает перемещения с ускорением в горизонтальном направлении при помощи встроенных функций языка программирования математической системы MATLAB.

Элементы программного кода могут быть использованы для моделирования колебаний грузового каната с грузом при рабочих перемещениях ГК различных типов.

В качестве примера, демонстрирующего работоспособность созданной математической модели, приведены данные результатов моделирования при движении точки подвеса

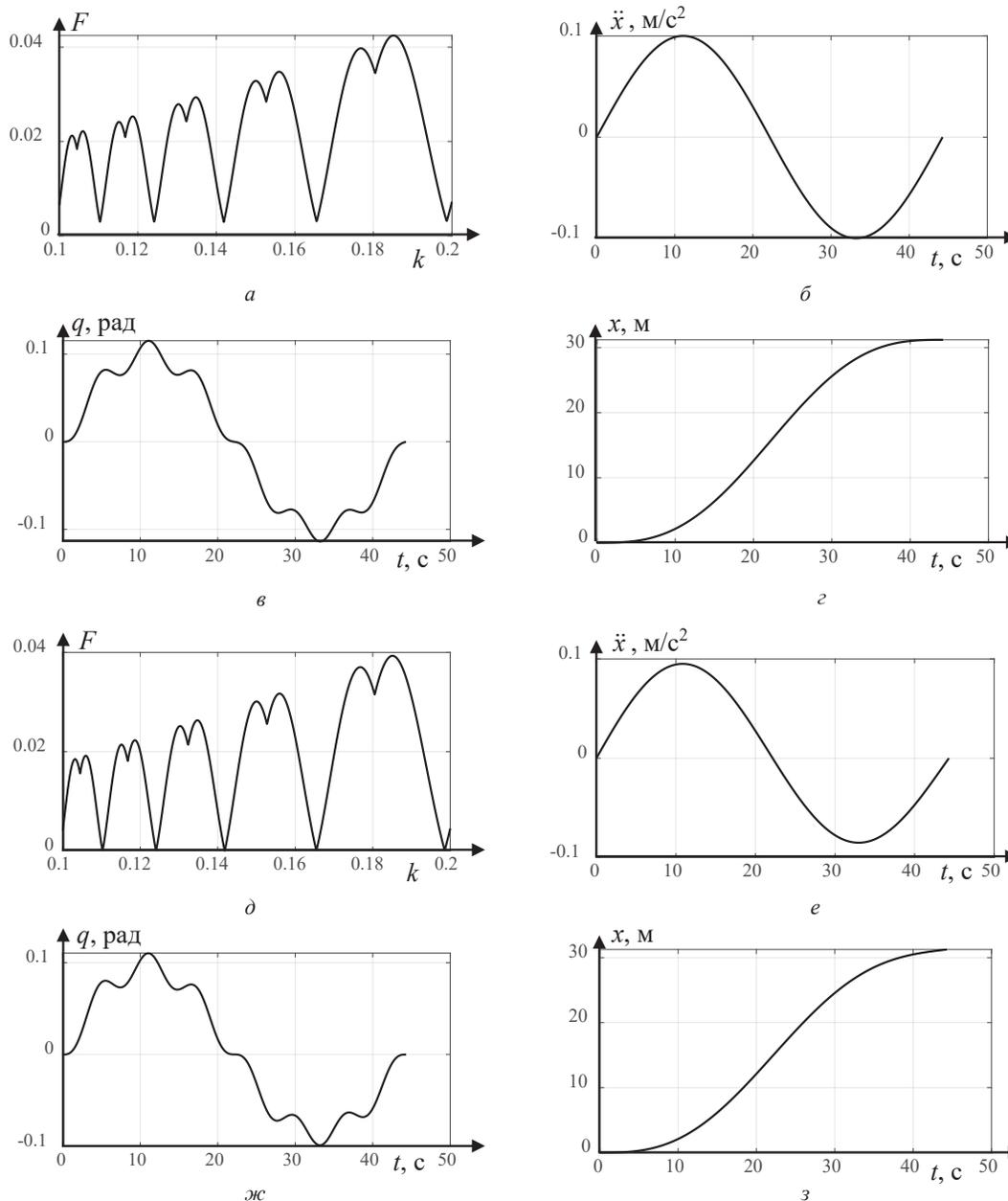


Рисунок 2 – Функциональные зависимости целевой функции  $F$  и временные зависимости ускорения точки подвеса  $\ddot{x}$ , угла отклонения каната  $q$  и перемещения точки подвеса  $x$ : а –  $F(k)$  при  $k_1=0$ ; б –  $\ddot{x}(t)$  при  $k_1=0$  и  $k=0.1419$ ; в –  $q$  при  $k_1=0$  и  $k=0.1419$ ; г –  $x(t)$  при  $k_1=0$  и  $k=0.1419$ ; д –  $F(k)$  при  $k_1=0.0045$ ; е –  $\ddot{x}(t)$  при  $k_1=0.0045$  и  $k=0.1418$ ; ж –  $q(t)$  при  $k_1=0.0045$  и  $k=0.1418$ ; з –  $x(t)$  при  $k_1=0.0045$  и  $k=0.1418$

Figure 2 – Functional dependences of the  $F$  objective function and time dependences of the suspension point's acceleration, the angle of the  $q$  rope deflection and the movement of the  $x$  suspension point: а –  $F(k)$  at  $k_1=0$ ; б –  $\ddot{x}(t)$  for  $k_1=0$  and  $k=0.1419$ ; в –  $q$  for  $k_1=0$  and  $k=0.1419$ ; г –  $x(t)$  for  $k_1=0$  and  $k=0.1419$ ; д –  $F(k)$  at  $k_1=0.0045$ ; е –  $\ddot{x}(t)$  at  $k_1=0.0045$  and  $k=0.1418$ ; ж –  $q(t)$  at  $k_1=0.0045$  and  $k=0.1418$ ; з –  $x(t)$  at  $k_1=0.0045$  and  $k=0.1418$

груза с ускорением, изменяющимся по синусоиде, а также по синусоиде с равномерным убыванием амплитуды.

Показано, что при отсутствии убывания амплитуды у синусоиды ускорения точки подвеса, т.е. при симметричном характере разгона и последующего торможения, не достигается полное устранение остаточных колебаний в конечный момент времени процесса. Хотя величина угловой скорости остаточных колебаний грузового каната ГК и составляет незначительную величину 3-го порядка малости в самом благоприятном расчетном случае (порядка  $10^{-3}$  рад/с).

Наиболее подходящий расчетный случай при симметричном характере разгона и последующего торможения точки подвеса по синусоиде достигается при симметричном характере скорости изменения угла наклона грузового каната (см. рисунок 1, б).

В то же время изменение характера ускорения точки подвеса с симметричного на несимметричный (введение убывания амплитуды синусоиды ускорения точки подвеса) позволяет полностью устранить остаточные колебания грузового каната ГК после окончания цикла разгона с торможением.

Разработанная математическая модель с использованием элементов программирования языка MATLAB может быть при необходимости легко модифицирована и использована для исследования колебаний динамической системы ГК с подвижной точкой подвеса груза при любых других видах воздействий со стороны привода. Перспективная область использования разработанной модели – исследование и разработка методов уменьшения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого ГК с нежестким грузовым канатом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Ji Y., Leite F. Automated tower crane planning: leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking // *Automation in construction*. 2018. Vol. 9. Pp. 78–90. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.003.
2. Pal U., Mukhopadhyay G., Sharma A., Bhat-tacharya S. Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop // *International journal of fatigue*. 2018. Vol. 116. Pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.019.
3. Chu Y., Hatledal L.I., Zhang H., Aesoy V., Ehlers S. Virtual prototyping for maritime crane design and operations // *Journal of marine science and technology*. 2018. Vol. 23. No. 4. Pp. 754–766. DOI: 10.1007/s00773-017-0509-z.
4. Mori Y., Tagawa Y. Vibration controller for overhead cranes considering limited horizontal acceleration // *Control engineering practice*. 2018.

Vol. 81. Pp. 256–263. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.009.

5. Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Fomin N.V., Belyi A.V. Overhead crane computer model // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Pp. 22–28. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022028.

6. La V.D., Nguyen K.T. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 116 Pp. 310–321. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.06.056.

7. Korytov M., Shcherbakov V., Titenko V. Analytical solution of the problem of acceleration of cargo by a bridge crane with constant acceleration at elimination of swings of a cargo rope // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944, No. 1. Pp. 12–62. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012062.

8. Chen H., Fang Y., Sun N. A payload swing suppression guaranteed emergency braking method for overhead crane systems // *Journal of vibration and control*. 2018. Vol. 24. No. 20. Pp. 4651–4660. DOI: 10.1177/1077546317731967.

9. Maghsoudi M. J., Ramli L., Sudin, S. Improved unity magnitude input shaping scheme for sway control of an underactuated 3D overhead crane with hoisting // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 123. Pp. 466–482. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.12.056.

10. Ouyang H., Hu, J., Zhang G. Decoupled linear model and S-shaped curve motion trajectory for load sway reduction control in overhead cranes with double-pendulum effect // *Proceedings of the institution of mechanical engineers part C-journal of mechanical engineering science*. 2019. Vol. 233. No. 10. Pp. 3678–3689. DOI: 10.1177/0954406218819029.

11. Miao Y., Xu F., Hu, Y. Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm // *Advances in mechanical engineering*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 1687814019834458. DOI: 10.1177/1687814019834458.

12. Ma X., Bao H. An anti-swing closed-loop control strategy for overhead cranes // *Applied Sciences-Basel*. 2018. Vol. 8. No. 9. P. 1463. DOI: 10.3390/app8091463.

13. Spruogis B., Jakstas A., Gican V., Turla V., Moksins V. Further research on an anti-swing control system for overhead cranes // *Engineering technology & applied science research*. 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 2598–2603.

14. Matsunaga M., Nakamoto M., Yamamoto T. A sound-based measurement of sway angle for anti-sway control of overhead crane // *Journal of robotics networking and artificial life*. 2018. Vol. 4 No. 4. Pp. 322–325. DOI: 10.2991/jrnal.2018.4.4.14.

15. Zhang M. Название: Finite-time model-free trajectory tracking control for overhead

cranes subject to model uncertainties, parameter variations and external disturbances // Transactions of the institute of measurement and control. 2019. Vol. 41. No. 12. Pp. 3516–3525. DOI: 10.1177/0142331219830157.

16. Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y. Antiswing cargo transportation of underactuated tower crane systems by a nonlinear controller embedded with an integral term // IEEE transactions on automation science and engineering. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 1387–1398. DOI: 10.1109/TASE.2018.2889434.

17. Abdel-razak M.H., Ata A.A., Mohamed K.T., Haraz E.H. Proportional-integral-derivative controller with inlet derivative filter fine-tuning of a double-pendulum gantry crane system by a multi-objective genetic algorithm // Engineering optimization. 2019. Vol. 0. Pp. 1–22. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1603300.

18. Huang X., Ralescu A.L., Gao H., Huang H. A survey on the application of fuzzy systems for underactuated systems // Proceedings of the institution of mechanical engineers part i-journal of systems and control engineering. 2019. Vol. 233. No. 3. Pp. 217–244. DOI: 10.1177/0959651818791027.

19. Wang J., Qiang B., Du W., He Z., Dong S., Guan B. Control Technology for Overhead Crane System Based on Particle Swarm Algorithm Optimization PID Control // Advances in materials, machinery, electronics. III Book series: AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2073. UNSP 020095-1. DOI: 10.1063/1.5090749.

20. Korytov M.S., Shcherbakov V.S. Cargo transportation by bridge cranes along a predetermined trajectory without uncontrollable sways // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 72-79. DOI: 10.24874/jsscm.2018.12.02.05.

**Приводится на русском языке и латинице согласно правилам для References.**

**Поступила 02.09.2019, принята к публикации 25.10.2019.**

**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**

*Корытов Михаил Сергеевич – д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф. АКМиТ (644080, г. Омск, пр. Мира 5, kms142@mail.ru.).*

*Щербakov Виталий Сергеевич, – д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, ResearcherID N-1716-2017, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф.*

*АППи (644080, г. Омск, пр. Мира 5, sherbakov\_vs@sibadi.org.).*

*Беляков Виталий Евгеньевич – ст. преподаватель, Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации (г. Омск, Военный 14-й городок, 119, vitaliy\_belyakov@mail.ru.).*

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile, Construction Materials and Technologies, ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: kms142@mail.ru).*

*Vitaliy S. Shcherbakov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering, Siberian State Automobile and Highway University, ORCID: 0000-0002-3084-2271, (644088, Omsk, 5, Mira Ave, e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org).*

*Vitaliy E. Belyakov – Senior Lecturer, Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Krulev (644088, Omsk, 119, Military 14<sup>th</sup> town, e-mail: vitaliy\_belyakov@mail.ru).*

#### **ВКЛАД СОАВТОРОВ**

*Корытов Михаил Сергеевич. Исследование состояния вопроса, библиографический поиск, составление уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности методики, вычислительная проверка методики.*

*Щербakov Виталий Сергеевич. Формулировка проблемы, разработка общей концепции моделирования рабочего процесса грузоподъемного крана, написание заключения.*

*Беляков Виталий Евгеньевич. Написание введения, обработка результатов вычислительного эксперимента, визуализация и оформление графиков.*

#### **AUTHORS' CONTRIBUTION**

*Mikhail S. Korytov – research of the problem; bibliographic search; compilation of equations of a mathematical model; development of the software product to test the operability of the technique; computational verification of the technique.*

*Vitaliy S. Shcherbakov – formulation of the problem; developing the general concept for modeling the working process of a crane; conclusion's writing.*

*Vitaliy E. Belyakov – introduction's writing; processing the results of a computational experiment; visualization and design of graphs.*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕМОНТНОМ РАСТАЧИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

**В.Е. Овсянников, \*В.И. Васильев**  
Курганский государственный университет,  
г. Курган, Россия  
\*vik9800@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В конструкциях строительно-дорожных машин довольно широко используются детали с отверстиями. Для черновой, получистовой, а в ряде случаев и чистой обработки таких поверхностей применяется растачивание. Данный вид обработки зачастую сопровождается негативным характером колебательных процессов, что приводит к снижению точности и качества поверхности. В данной статье изучается возможность использования расчетного метода исследования колебательных процессов при растачивании, который позволит назначать режимы резания, обеспечивающие требуемые выходные параметры процесса обработки.

**Материалы и методы.** В качестве расчетной модели расточного резца была использована двухопорная балка. Решение задачи моделирования колебаний в рассматриваемом случае сводится к определению перемещений точки, соответствующей вершине резца (точки приложения равнодействующей сил резания). Определение перемещений производилось с использованием интегралов Мора. В модели учтено влияние образования и отделения стружки за счет введения дополнительной периодически действующей возмущающей силы.

**Результаты.** Расчет значений сил резания выполнялся с использованием зависимостей степенного вида. В качестве частоты возмущающего воздействия была принята частота стружкообразования. Частота образования стружки определялась на основе расчетных зависимостей, которые связывают параметры инструмента, срезаемого слоя и режимов резания. Были получены реализации колебательных процессов и изучено влияние различных факторов на амплитуду колебаний.

**Обсуждение и заключение.** Оценка адекватности полученных результатов производилась сравнением с данными эксперимента. В среднем ошибка не превышала 20%. Разработанная модель учитывает геометрические параметры инструмента (вылет, углы пластины и т.д.), режимы резания и механические свойства обрабатываемого материала, параметры образующейся стружки. Модель может использоваться как при проектировании операций растачивания, так и при оптимизации режимов резания с целью повышения производительности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительно-дорожные машины, растачивание, колебания, вибрации, отверстия, резец, моделирование.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы выражают благодарность рецензентам, которые будут работать с настоящей статьей.

© В.Е. Овсянников, В.И. Васильев



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## DETAILS' REPAIR OF CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES: FLUCTUATIONS' MODELLING

V.E. Ovsyannikov, \*V.I. Vasilyev  
Kurgan State University,  
Kurgan, Russia  
\*vik9800@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Hole details are quite widely used in structures of construction and road machines. The specialists apply boring for draft, semi-fair, and in some cases for fair processing of such surfaces. This type of processing is often followed by the negative nature of oscillatory processes that leads to decrease in accuracy and in the surface quality. The paper studies the possibility of the calculation method's usage in oscillatory processes, which allows assigning the cutting modes by providing required output parameters.

**Materials and methods.** The authors used the double-support beam as a design model of a boring cutter. The solution of the fluctuations' modeling came down to definition of point movements, which corresponded to cutter top (points of application equally effective cutting forces). The authors made the definition of movements with use of Mor integrals. Therefore, the paper considered the impact of chip formation and separation due to perturbing forces.

**Results.** The authors carried out the calculation of forces' values in cutting with use of the degree dependences. Moreover, the authors accepted the formation's frequency as the frequency of the perturbing influenced structure. The frequency of the chip formation was defined on the basis of estimated dependences, which connected parameters of the tool, the cut-off layer and modes of cutting. As a result, the author received the implementations of oscillatory processes and studied the influence of different factors on vibration amplitude.

**Discussion and conclusions.** The authors make assessment of the received results' adequacy by comparison with experimental data. The error doesn't exceed 20%. The developed model considers geometrical parameters of the tool (a departure, plate corners, etc.), the modes of cutting both mechanical properties of the processed material and parameters of the chip formation. The model can be used both at design of boring operations and by optimization of the cutting modes for the purpose of productivity increase.

**KEYWORD:** construction and road machines, boring, fluctuations, vibrations, openings, cutter, modeling.

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

© V.E. Ovsyannikov, V.I. Vasilyev



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

## ВВЕДЕНИЕ

В конструкциях строительно-дорожных машин используется достаточно большое количество ответственных деталей, имеющих исполнительные поверхности – отверстия (детали двигателей, тормозных систем, трансмиссии, навесных агрегатов и др.). Точность и качество поверхности оказывают существенное влияние на работоспособность данных деталей и узлов, в которые они входят<sup>1</sup> [1, 2, 3, 4].

Одним из наиболее широко используемых методов черновой, получистовой, а в ряде случаев и финишной обработки является растачивание. Чаще всего данный вид обработки выполняется либо на расточных станках с применением вращающегося инструмента, либо на токарных станках, когда инструмент не выполняет вращательного движения. Однако в обоих случаях используется режущий инструмент, который имеет значительный вылет, что существенно снижает его жесткость и виброустойчивость. В условиях ремонтного производства данное обстоятельство дополнительно усугубляется тем, что используемое оборудование изношено, и средства технологического оснащения также далеко не всегда находятся в удовлетворительном состоянии. Одним из наиболее распространенных видов брака при такой обработке является наличие на поверхности рисок от вершины резца (в производственной практике такой брак называется «дробление»). Помимо этого негативный характер колебательных процессов в ходе растачивания может приводить к ухудшению высотных параметров шероховатости обработанной поверхности и точности формы.

Главной причиной возникновения указанных несоответствий являются вибрации элементов технологической системы. В случае, когда отверстие в детали должно быть выполнено с высокими показателями точности и качества (IT8...6 и Ra1.6...0.32), наличие указанных выше дефектов неприемлемо. Причем даже при использовании после растачивания финишной обработки (например, хонингования) возникшие дефекты удается ликвидировать далеко не всегда.

Следовательно, возникает необходимость определения режимов обработки, дающих

нужную виброустойчивость процесса. Традиционно решение данной проблемы производится опытным путем, т.е. выполняются пробные проходы на различных режимах резания, после чего выбирается значение подачи и скорости резания, обеспечивающее необходимое качество поверхности и точность. Основным недостатком такого подхода является то, что подбор требует большого количества времени и определенных материальных затрат в виде изготовления пробных деталей, которые заведомо являются бракованными. Кроме того, подобные операции может выполнять рабочий с достаточно большим производственным опытом. Поэтому разработка расчетных методик определения режимов растачивания с учетом обеспечения требуемой виброустойчивости является актуальной задачей.

Обеспечению необходимой виброустойчивости посвящены исследования многих отечественных и зарубежных исследователей<sup>2</sup> [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. При этом использовались как экспериментальные исследования<sup>2</sup> [1, 2, 5, 7, 13, 16], так и теоретические модели [5, 8, 11, 15, 18] и имитационное моделирование на основе метода конечных элементов [10, 18]. К основным недостаткам экспериментального подхода можно отнести ограниченность применения результатов (их можно применять лишь для конкретных условий, в которых был проведен эксперимент). Использование моделей на основе метода конечных элементов требует мощных вычислительных систем и дорогостоящих программных пакетов, поэтому использование расчетных моделей представляется наиболее перспективным для решения поставленной задачи.

Чаще всего расчетные модели, описывающие колебательные процессы применительно к механической обработке, учитывают только характеристики материала обрабатываемой заготовки, режимы резания и параметры инструмента [6, 8, 11, 15, 18]. Однако для более адекватного описания процессов необходимо еще учитывать возмущающее воздействие, которое оказывает образующаяся в ходе обработки стружка.

**Целью работы** является разработка расчетной модели колебаний расточного резца, позволяющей определять режимы резания, обеспечивающие необходимую виброустойчивость при обработке деталей строительно-дорожных машин.

<sup>1</sup> Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М. : Машиностроение, 1984. 184 с.

<sup>2</sup> Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Синопальников В.А. Диагностирование и контроль технологических систем в машиностроении. М. : ИТО, 2008. 200 с.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В качестве расчетной модели расточного резца была применена двухопорная балка. В работе использована плоская расчетная модель. В качестве возмущающего фактора рассматривается равнодействующая тангенциальной и радиальной сил резания. На рисунках 1 и 2 представлены расчетные схемы и единичная система.

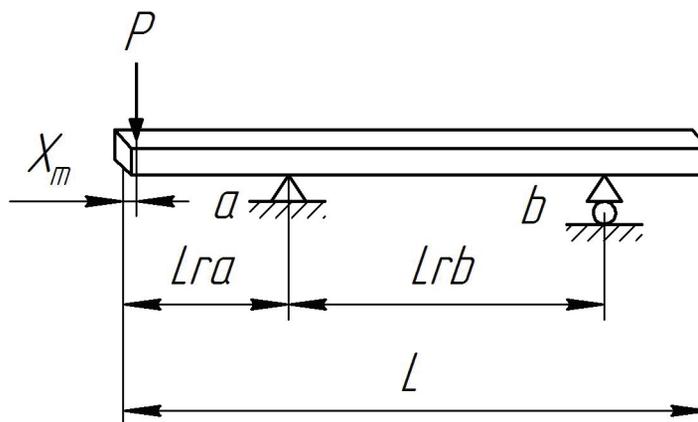


Рисунок 1 – Расчетная схема

Figure 1 – Calculation scheme

Решение задачи моделирования колебаний в рассматриваемом случае сводится к определению перемещений точки приложения возмущающего воздействия (вершине режущего инструмента). Для того чтобы определить данную величину, необходимо рассчитать параметры единичной и грузовой систем [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

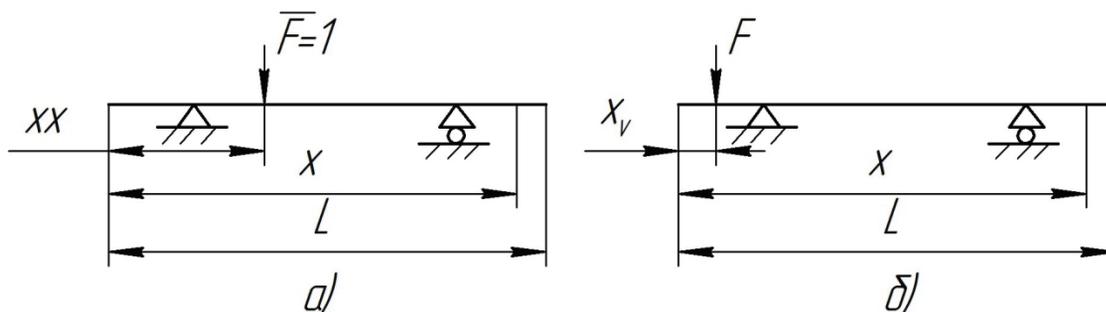


Рисунок 2 – Расчетные схемы: а – единичная система; б – грузовая система

Figure 2 – Calculation diagrams: a – single system; b – cargo system

Возникающие в державке расточного резца внутренние силовые факторы можно определить с использованием следующих выражений [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]:

$$M(F, R_A, R_B, x) = R_A(x - L_{RA}) \cdot (x > L_{RA}) + R_B \cdot (x - L_{RB}) \cdot (x > L_{RB}) - F(x - x_m) \cdot (x > x_m), \quad (1)$$

$$M1(R_A, R_B, xx, x) = R_A(x - L_{RA}) \cdot (x > L_{RA}) + R_B \cdot (x - L_{RB}) \cdot (x > L_{RB}) - 1(x - xx) \cdot (x > xx), \quad (2)$$

где  $F$  – возмущающая сила;  $R_A, R_B$  – опорные реакции;  $xx$  – точка приложения усилий;  $x$  – значение текущей координаты (характеризует положение текущего сечения);  $L_{RA}, L_{RB}$  – расстояния, характеризующие положение опор;  $x_m$  – вылет инструмента.

Определение искомой величины перемещения производим на основе интеграла Мора<sup>3</sup> [6, 7, 8]:

$$\Delta(F) = \int_0^L \frac{M(F, R_A(F), R_B(F), x) \cdot M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)}{EJ} dx, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $I$  – момент инерции расчетного сечения балки.

Выражение для определения частоты собственных колебаний державки расточного реза имеет вид [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Частота собственных колебаний определяется следующим образом<sup>3</sup> [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m + k_{\text{ПП}} m_0}}, \quad (4)$$

где  $k_{\text{ПП}} = \frac{\rho}{m_0 \Delta(F)^2} \cdot \int_0^L A(X) \Delta_X(X)^2 dx$  – коэффициент приведения массы;  $m_0$  – собственная масса балки;  $m$  – сосредоточенная масса (в нашем случае  $m=P/g$ ).

$$k = \frac{1}{\int_0^L \frac{M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)^2}{EJ} dx} \quad - \quad \text{жесткость балки.}$$

Амплитуда колебаний определяется следующим образом<sup>3</sup> [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]:

$$A = \sqrt{u_0^2 + \frac{(v_0 + hu_0)^2}{\omega^2}}, \quad (5)$$

где  $h$  – коэффициент затухания колебаний [15];  $u_0$  – собственная частота колебаний балки;

$u_0$  – частота действия динамической составляющей силы (в нашем случае действия срывающей стружки при растачивании).

Учет периодического воздействия возмущающей силы, вызванного образованием стружки, будем производить на основе интеграла Дюамеля<sup>3</sup> [15]:

$$u(F, t) = \frac{1}{m \cdot \omega} \cdot \int_0^t F(\tau) \cdot e^{-h(t-\tau)} \cdot \sin(\omega \cdot (t - \tau)) d\tau. \quad (6)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Величина возмущающего воздействия определялась с использованием расчетных зависимостей вида [15]:

$$Pz, y, x = 10 \cdot Cp \cdot t^x s^y v^n \cdot Kp, \quad (7)$$

где  $Cp, x, y, n$  – поправочные коэффициенты;  $t$  – глубина резания;  $S$  – подача;  $V$  – скорость резания;  $Kp$  – коэффициент, учитывающий условия резания.

---

<sup>3</sup> Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М. : Машиностроение, 1984. 184 с.

В качестве частоты возмущающего воздействия была принята частота стружкообразования. В работах [16, 17] установлено, что частота образования стружки зависит от ее вида, параметров инструмента и режимов обработки. На сегодняшний день в основном применяются инструменты с режущей частью из твердого сплава. При использовании таких инструментов преимущественно образуется суставчатая стружка, тогда зависимость для определения частоты образования стружки имеет вид [16]:

$$v = T^{-1} = 2V \sin \varphi (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)) / \rho_1, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – главный угол в плане резца;  $\gamma$  – передний угол;  $\rho_1$  – радиус при вершине резца.

В качестве примера рассмотрим чистовое растачивание отверстия  $\varnothing 75$  мм;  $V=176$  м/мин;  $t=0.5$  мм;  $S=0.4$  мм/об; главный угол в плане резца  $\varphi=93^\circ$ ; передний угол  $\gamma=5^\circ$ ;  $\rho_1=1$  мм; обрабатываемый материал – сталь 45; инструментальный материал – твердый сплав марки Т15К6; сечение державки 25x16 мм.

Пример реализации колебательного процесса приведен на рисунке 3.

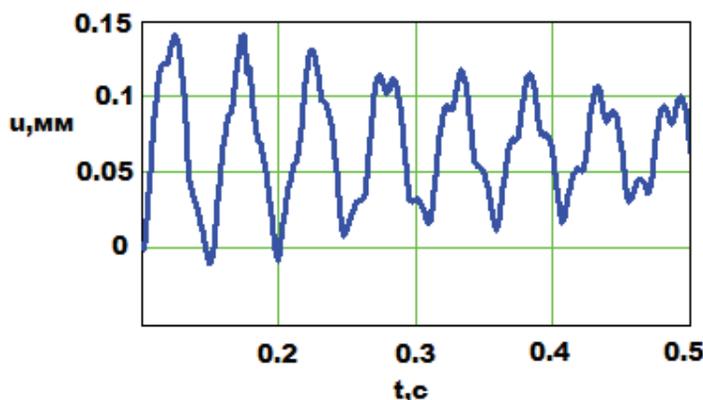


Рисунок 3 – Пример реализации колебаний

Figure 3 – Example of vibration implementation

### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки степени адекватности полученных результатов проведем сравнение результатов расчетов с использованием разработанной модели и экспериментальных исследований, проведенных в работе [18]. Принимаем вылет резца 100 мм и сечение державки 25x25 мм, тогда погрешность определения амплитуды составляет

$$\Delta = \frac{\Delta_{теор} - \Delta_{эсп}}{\Delta_{теор}} \times 100\% = \frac{38 - 32}{38} \times 100\% = 15.7\%.$$

В целом погрешность определения максимальной амплитуды колебаний резца не превышает 18%. Учет параметров стружки в расчетной модели очень важный фактор, ввиду того что параметры стружки оказывают существенное влияние на колебательные процессы при чистовой обработке. На рисунке 4 приведена реализация колебательного процесса при увеличении частоты образования стружки на 40% (по сравнению с колебательным процессом, представленным на рисунке 3).

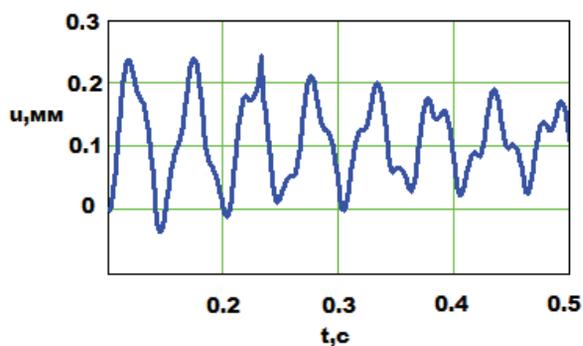


Рисунок 4 – Пример реализации колебаний при увеличении частоты образования стружки на 40%

Figure 4 – Example of vibration implementation by increase frequencies of the shaving formation for 40%

Сравнивая амплитуды колебаний, можно сказать, что во втором случае она выросла более чем на 55%.

Таким образом, разработанная модель учитывает следующие аспекты процесса обработки отверстий:

- геометрические параметры инструмента: вылет резца, углы режущей пластины, размер державки;
- режимы резания и механические свойства обрабатываемого материала;
- параметры образующейся стружки.

Последовательность назначения и оптимизации режимов обработки с целью обеспечения требуемой виброустойчивости можно представить в виде блок-схемы (рисунок 5).

В качестве параметра, который подвергается корректировке, выбрана подача, т.к. в условиях ремонтного производства величина глубины резания обычно определена заранее, причем желательно удаление слоя припуска выполнять за один проход (поэтому этот параметр в модели не изменяется). Данная модель может быть использована при решении задач проектирования операций растачивания отверстий деталей, входящих в конструкции строительно-дорожных машин либо при оптимизации режимов резания с целью повышения производительности обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шустиков А.Д. Влияние вибраций на износ инструмента // СТИН. 2000. № 1. С. 12–16.
2. Схиртладзе А.Г. Повышение точности растачивания отверстий // Технология машиностроения. 2006. № 2. С. 15–17.
3. Корнилович С.А. Причины интенсивного изнашивания цилиндров двигателей ЯМЗ-

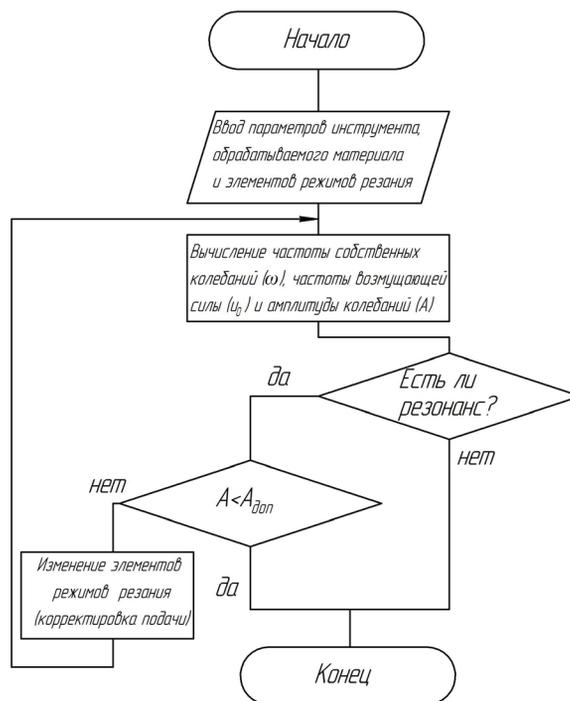


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма назначения режимов обработки детали

Figure 5 – Flow-Chart for the processing modes

238НБ // Вестник СибАДИ. 2017;(2(54)):70-76. doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-70-76.

4. Корнилович С.А., Трофимов Б.С. Анализ точности, стабильности технологического процесса шлифования коленчатых валов // Вестник СибАДИ. 2018;(6(15)):878-885. doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-878-885.

5. Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2008. № 57. P. 371–374.

6. Black J.T., Kohser R. Materials and Processes in Manufacturing. Danvers: John Wiley & Sons, 2008. 1031 p.

7. Gaurav Saindane. Experimental Investigation of Vibration Damping in Boring Operation using passive damper / Gaurav Saindane, Amit Jakikore, Ashish Umbarkar // International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology. Volume 2, Issue 3. URL: www.ijreat.org/Papers2014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf.

8. Miguélez M.H., Rubio L., Loya J.A., Fernández-Sáez J. Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers // International Journal of Mechanical Sciences. October 2010. Vol. 52, Issue 10. P. 1376–1384.

9. Kai Cheng. *Machining Dynamics. Fundamental, applications and practices* / Cheng Kai. Springer Series in Advanced Manufacturing. Advanced Manufacturing & Enterprise Engineering Department School of Engineering and Design. Brunel University. Middlesex UB8 3PH. UK. 2009.

10. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Education, 2009. 1197 p

11. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations / Hessainia Z., Belbah A., Athmane Y. M., Mabrouki T., Rigal J. F. // *Measurement*. – 2013. – 46 (5). – P. 1671–1681.

12. Ozel T., Zeren E. Finite Element Analysis of The Influence of Edge Roundness on The Stress and Temperature Fields Induced by High Speed Machining // *Int. J. Adv. Manuf. Technology*. 2007. Вып. 35. № 3. pp. 255–267.

13. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. October 2012. Volume 61. pp. 27–47.

14. Sortino M., Totis G., Prosperi F. Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. 61. P. 58–70.

15. Мещеряков Р.К. [и др.] Управление точностью обработки при растачивании отверстий // *Вестник машиностроения*. 1988. № 9. С. 30–33.

16. Праведников И.С. Исследование механизма образования циклической стружки // *Нефтегазовое дело*. 2011. № 3. С. 283.

17. Маслеников И.А. Зависимость вида стружки от условий процесса резания при обработке пластичных материалов лезвийным инструментом // *Металлообработка*. 2013. №5–6(77–78). С. 9–16.

18. Хорошайло В.В. Повышение виброустойчивости растачивания на токарно-винторезных станках // *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 1/1 (27). С. 17–22.

## REFERENCES

1. Shustikov A. D. Vliyanie vibracij na iznos instrumenta [Influence of vibrations on wear tool]. *STIN*. 2000; 1: 12–16 (in Russian).

2. Skhirtladze A.G. Povyshenie tochnosti rastachivaniya otverstij [Increase in accuracy of the hole boring]. *Technology of mechanical engineering*. 2006; 2: 15-17 (in Russian).

3. Kornilovich S.A. Prichiny intensivnogo iznashivaniya cilindrov dvigatelej YAMZ-238NB [Reasons of intensive wear of cylinders of YaMZ-238NB engines]. *Vestnik SIBADI*. 2017; (2(54)): 70–76. doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2 (54)-70-76 (in Russian).

4. Kornilovich S.A., Trofimov B.S. Analiz tochnosti, stabil'nosti tekhnologicheskogo processa shlifovaniya kolenchatyh valov [Analysis of accuracy, stability of technological process of the bent shafts' grinding]. *Vestnik SIBADI*. 2018; (6(15)): 878-885. doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-878-885 (in Russian).

5. Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008; 57: 371–374.

6. Black J.T., Kohser R. *Materials and Processes in Manufacturing*. Danvers :Jonh Wiley & Sons, 2008. 1031 p.

7. Gaurav Saindane, Amit Jakikore, Ashish Umbarkar Experimental Investigation of Vibration Damping in Boring Operation using passive damper // *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*; Volume 2, Issue 3. URL: www.ijreat.org/Papers2014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf.

8. Miguélez M. H., Rubio L., Loya J. A., Fernández-Sáez J. Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers // *International Journal of Mechanical Sciences*. October 2010; Vol. 52, Issue 10: 1376–1384.

9. Kai Cheng. *Machining Dynamics. Fundamental, applications and practices* / Cheng Kai. Springer Series in Advanced Manufacturing. Advanced Manufacturing & Enterprise Engineering Department School of Engineering and Design. Brunel University. Middlesex UB8 3PH. UK. 2009.

10. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Education, 2009. 1197 p.

11. Hessainia Z., Belbah A., Athmane Y. M., Mabrouki T., Rigal J. F. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations // *Measurement*. 2013; 46 (5): 1671–1681.

12. Ozel T., Zeren E. Finite Element Analysis of The Influence of Edge Roundness on The Stress and Temperature Fields Induced by High Speed Machining // *Int. J. Adv. Manuf. Technology*. 2007; 35. no 3: 255–267.

13. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. October 2012; Volume 61: 27–47.

14. Sortino M., Totis G., Proserpio F. Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012; 61: 58–70.

15. Mescheryakov R.K. [et al.] Optimizaciya processov obrabotki otverstij [Control of the accuracy during the holes' weeding] // *Journal of Mechanical Engineering*. 1988; 9: 30-33 (in Russian).

16. Pravednikov I.S. Issledovanie mekhanizma obrazovaniya ciklicheskoj struzhki [Research of the mechanism of the cyclic chip's formation]. *Oil and gas business*. 2011; 3: 283 (in Russian).

17. Maslenikov I.A. Zavisimost' vida struzhki ot uslovij processa rezaniya pri obrabotke plastichnyh materialov lezviynym instrumentom [Dependence of the chip type on conditions of cutting when processing plastic materials by the edge tool]. *Metal working*. 2013; 5–6(77–78): 9–16 (in Russian).

18. Horoshaylo V.V. Povyshenie vibroustojchivosti rastachivaniya na tokarnovintoreznyh stankah [Increase in the boring vibrostability on the cutting machines]. *Technological audit and reserves of production*. 2016; 1/1 (27):17–22 (in Russian).

**Поступила 16.08.2019, принята к публикации 25.10.2019.**

**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

Овсянников Виктор Евгеньевич – канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-8775-0781, доц. кафедры «Автоматизация производственных процессов», Курганский го-

сударственный университет, (640020, г. Курган, ул. Советская, 63, стр. 4, imk@kgsu.ru, vik9800@mail.ru).

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

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

#### AUTHORS' CONTRIBUTION

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

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

## **РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ**

# РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

С.А. Аземша

Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь  
s-azemsha@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Городской общественный пассажирский транспорт играет огромную роль в жизни современных городов. В то же время его финансовое состояние оставляет желать лучшего. Цель этой работы – применением научных методов установить перспективное направление повышения эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта.

**Материалы и методы.** Корреляционным и регрессионным анализом установлено наличие связи между окупаемостью работы маршрута общественного городского пассажирского транспорта и показателями использования вместимости пассажирских транспортных средств – средним значением коэффициента пассажиронапряженности и величиной его разброса.

Предложено новое направление повышения эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта, основанное на использовании пассажирских транспортных средств переменной длины (модульных транспортных средств), позволяющее более точно «подстраиваться» под мощность пассажиропотока.

**Результаты.** Приведенные примеры расчетов показывают, что применение модульных пассажирских транспортных средств позволит повысить окупаемость работы общественного транспорта на 26%.

**Обсуждение и заключение.** Наличие парка из модулей пассажирских транспортных средств одинаковой вместимости позволяет перевозчику более гибко подстраиваться под существующую мощность пассажиропотока, повышая тем самым коэффициент пассажиронапряженности и уменьшая разброс его значений относительно среднего. Все это приводит к повышению эффективности работы городского общественного пассажирского транспорта.

Дальнейшие работы в данном направлении целесообразно сосредоточить на обосновании вместимости модуля, разработке технологии осуществления перевозок пассажиров модульными транспортными средствами, формулировании технических требований к конструкции модуля.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** эффективность перевозок, городской общественный пассажирский транспорт, использование вместимости общественного транспорта, регрессионный анализ, модульный транспорт, модульный автобус.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Автор выражает свою благодарность руководителям предприятий пассажирских перевозчиков г. Гомеля, предоставившим необходимые статистические данные, а также рецензентам данной статьи.

© С.А. Аземша



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# DEVELOPMENT OF PROPOSALS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT

S.A. Azemsha

Belarusian State University of Transport,  
Gomel, Republic of Belarus  
s-azemsha@yandex.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** Urban public transport plays an important role in modern cities. At the same time, the financial performance of public transport's work is far from ideal. The purpose of the paper is to identify a promising area for increasing the payback of public urban passenger transport by application of different scientific methods.

**Materials and methods.** The paper demonstrated the significant statistical relationship between the route's payback of public urban passenger transport and the indicators of using the capacity of passenger vehicles. Moreover, the author presented the average value of the passenger stress coefficient. The author also proposed to increase the payback of public urban passenger transport based on the use of variable-length electric buses (modular vehicles), which allowed more precise adjustment to the capacity of passenger traffic.

**Results.** Calculation examples showed that the use of modular passenger vehicles increased the public transport's payback on 26%.

**Discussion and conclusions.** As a result, the presence of the electric bus modules' fleet of the same capacity allows the carrier flexibly adapting the existing passenger flow capacity. Therefore, such measures increase the passenger stress coefficient, reduce the spread of its values relative to the average value and lead to the increase in the payback of public passenger transport.

The author recommends to substantiate the capacity of the module, to develop technology for carrying passengers by modular vehicles and to formulate technical requirements for the module design in further research.

**KEYWORDS:** efficiency of transportation, public transport, use of public transport capacity, regression analysis, modular bus.

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The author expresses his gratitude to the heads of the passenger carrier enterprises of Gomel for the necessary statistics, as well as to the reviewers of the manuscript.

© S.A. Azemsha



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

### ВВЕДЕНИЕ

Городской общественный пассажирский транспорт (ГОПТ) – стратегическая отрасль, качество функционирования которой во многом определяет качество жизни горожан. Показатели экономической эффективности ГОПТ в настоящее время низки, что ведет к необходимости повышения стоимости проезда, снижению количества выполняемых рейсов, датированию его работы из бюджета. В таких условиях разработка мероприятий по повышению эффективности работы ГОПТ достаточно актуальна.

Вопросы повышения эффективности работы ГОПТ отражены во многих научных трудах. Основная идея этих работ сводится к тому, что из-за неравномерности пассажиропотока на маршрутах степень использования вместимости пассажирских транспортных средств невелика. Это приводит к тому, что перевозчик выполняет нерентабельные рейсы. В работе [1] авторы особое внимание уделили изучению использования вместимости пассажирских транспортных средств. Они установили, что в отношении наполняемости на многих маршрутах действует закон Паретто – на протяжении 80% пути маршрута используется только 20% вместимости автобусов. В работе [2] приведены сведения о динамике изменения наполняемости автобусов стран Евросоюза. Авторы подчеркивают, что уровень занятости для автобусов сильно различается между государствами-членами. Например, в Великобритании автобус перевозит в среднем около 9 человек, в то время как во Франции этот показатель составляет около 25. Различия между государствами-членами авторы объясняют различной организацией общественного транспорта (тарифы, частота, доступность и т. д.), а также формой собственности автобусных предприятий. Аналогичные исследования для США приведены в работе [3]. В Республике Беларусь также проводятся исследования по оценке эффективности использования вместимости пассажирских транспортных средств. В работе [4] показано, что уровень использования вместимости пассажирских транспортных средств невысок, при этом коэффициент пассажира напряженности составляет в среднем 30%. В [5] показано, что существует значимая неравномерность использования вместимости пассажирских транспортных средств по часам суток и на некоторых маршрутах по направлениям движения. Таким образом, видно, что проблема неэффективного использова-

ния вместимости пассажирских транспортных средств актуальна за рубежом и в Республике Беларусь.

Для повышения эффективности использования вместимости пассажирских транспортных средств ряд авторов предлагает модели распределения автобусов разной вместимости по маршрутам в разные часы суток с учетом неравномерности пассажиропотоков. Так, в работе [6] автор показывает, что безубыточность (нулевая рентабельность) работы общественного транспорта будет достигнута при коэффициенте использования вместимости 0,37. Расчеты велись при величине затрат перевозчика и стоимости проезда актуальных на момент проведения расчетов. Для повышения эффективности работы общественного транспорта автор предлагает распределять имеющиеся пассажирские транспортные средства разной вместимости по маршрутам с учетом мощности пассажиропотока на них. В [7] авторы указывают, что для минимизации суммарных издержек, связанных с эксплуатацией транспортной системы, необходимо выбирать оптимальную вместимость транспортных средств, а также оптимизировать интервалы движения. Одной из причин низкого наполнения пассажирских транспортных средств авторы отмечают их неоптимальную вместимость. При этом, как правило, вместимость завышена, что приводит к низкой степени наполняемости и увеличению интервалов движения. Для решения таких задач авторы предлагают двухуровневую математическую модель выбора подвижного состава необходимой вместимости.

Еще одна ветка работ, направленных на повышение эффективности работы общественного пассажирского транспорта, предлагает ранжирование маршрутов по их экономическим показателям и выставление их на аукцион. В работе [8] авторы проводят идею о том, что частная форма собственности, в том числе и на транспорте, более эффективна, чем государственная. Поэтому предлагается передать процесс оказания услуги (перевозки) частным перевозчикам. Однако с учетом анализа зарубежного опыта авторы рекомендуют сочетать и государственную, и частную форму автомобильных перевозчиков, между которыми производится разделение обслуживаемых ими маршрутов на тендерной основе. При этом на тендер выставляются одновременно рентабельные и нерентабельные маршруты, и победитель тендера будет обслуживать обе категории маршрутов, т.е. авторами предлагается

производить распределение маршрутной сети города по принципу равного долевого участия государственного и частного перевозчиков, предварительно категоризируя маршруты по признаку социальной значимости и доходности. Однако стоит заметить, что это предложение не повлияет на эффективность функционирования маршрутов с точки зрения повышения самоокупаемости. Оно лишь позволит снизить затраты бюджета на осуществление перевозок. В работе [9] авторы указывают, что городской общественный транспорт является, как правило, убыточным и требует значительных субсидий из бюджетов различных уровней. Но это не отменяет необходимости со стороны предприятий поиска решений, позволяющих снизить убытки и выйти на уровень положительной рентабельности производственного процесса. Для оценки эффективности муниципальных автобусных маршрутов авторы взяли метод ABC и XYZ-анализа, позволяющий при наличии достоверной информации оценить эффективность муниципальных маршрутов, например по прибыли за 1 рейс. Результатом работы стала структуризация маршрутов по вышеуказанному критерию с предложением последующей реализации через аукцион одновременно маршрутов с разной экономической эффективностью. Как и в работе [8], это предложение не повлияет на эффективность функционирования маршрутов с точки зрения повышения самоокупаемости. В работе [10] авторы предлагают повышать эффективность функционирования общественного транспорта путем снижения себестоимости его работы за счет реализации права на обслуживание пассажиров на каждом отдельном маршруте среди перевозчиков путем игры на понижение. Плату за проезд предполагается рассчитывать с учетом требований<sup>1</sup>. В статье [11] авторы показывают модель временного ряда (тренда) годового пассажиропотока от фактора времени. Ими для анализа и прогнозирования внутри годичных колебаний моделью сезонной волны (сезонных колебаний) использовался ряд Фурье. На основании полученных таким образом прогнозных данных по пассажиропотоку авторы предлагают различные мероприятия по обеспечению рентабельности работы: увеличение тарифа, снижение вместимости работающего на маршруте автобуса, увели-

чение интервала движения. Конечно же, такие мероприятия ухудшат качество обслуживания пассажиров, что несомненно приведет к еще большему падению спроса на этот вид перевозок. Так, например, в работе [12] авторы показывают наличие зависимости между удельной долей пассажиров, пользующихся общественным автомобильным транспортом и соотношением тарифа за проезд к бюджету прожиточного минимума. Установлено, что с ростом указанного соотношения, удельная доля пассажиров, пользующихся общественным автомобильным транспортом, снижается. Это предполагает необходимость опережающего темпа роста заработной платы по сравнению с ростом стоимости проезда.

Приведенный краткий обзор научной литературы показывает актуальность рассматриваемой в статье задачи повышения эффективности работы ГОПТ. Цель этой работы – применением научных методов установить перспективное направление повышения эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных взяты параметры работы автобусов на 16 городских маршрутах г. Гомеля. Общее число поездок по этим маршрутам равно 476. В качестве целевого параметра принята самоокупаемость работы на маршруте ( $O$ , %), а в качестве управляемых параметров для каждого маршрута следующие величины:

1. Средняя наполняемость за рейс ( $N_p$ , пасс) – отношение выполненных за рейс пассажиро-километров к длине рейса.

2. Коэффициент рейсовой вместимости ( $K_{рвм}$ ) – отношение выполненных за рейс пассажиро-километров транспортной работы к максимально возможной транспортной работе, определяемой произведением вместимости автобуса на расстояние поездки.

3. Коэффициент пассажиронапряженности ( $K_p$ ) – отношение максимального пассажиропотока за рейс (пассажиронапряженности) к вместимости автобуса.

4. Дисперсии параметров 1–3 ( $DN_p$ ,  $DK_{рвм}$ ,  $DK_p$ ).

5. Коэффициенты вариации параметров 1–3 ( $KN_p$ ,  $KK_{рвм}$ ,  $KK_p$ ).

<sup>1</sup> Распоряжение Министерства транспорта РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».

6. Количество разных вместимостей автобусов на маршруте ( $K_a$ ), шт.

7. Средняя вместимость автобусов на маршруте в период обследования ( $V_{ср}$ ), пасс.

8. Длина рейса ( $L_p$ ), км.

9. Суточный объем перевозок на маршруте по билетно-учетным листам ( $Q_b$ ), пасс/сут.

10. Суточный объем перевозок пассажиров по наблюдениям ( $Q_o$ ), пасс/сут.

11. Суточное количество рейсов на маршруте ( $K_p$ ), шт.

12. Отношение количества перевезенных за сутки пассажиров по билетно-учетным листам к числу пассажиров, которое могло бы быть перевезено за эти же сутки при максимальном использовании вместимости каждый рейс ( $Q_b/(K_p \cdot V_{ср})$ ).

13. Отношение количества перевезенных за сутки пассажиров по наблюдениям к числу пассажиров, которое могло бы быть перевезено за эти же сутки при максимальном использовании вместимости каждый рейс ( $Q_o/(K_p \cdot V_{ср})$ ).

Выдвигается гипотеза о наличии статистической связи между самоокупаемостью работы на маршруте ( $O$ ) и 13 вышеперечисленными параметрами. Поскольку исследуемые случайные величины распределены по законам, отличным от нормального, то для оценки связи между ними использовались непараметрические статистики: ранговая корреляция Спирмена, Гамма-корреляция и тау корреляции Кендалла, реализованные в [13]. Этот анализ показал наличие значимой статистической связи между самоокупаемостью работы на маршруте ( $O$ ) и средней наполняемостью за рейс ( $N_p$ , пасс), коэффициентом пассажиронапряженности ( $K_p$ ), коэффициентом вариации параметров, показывающих степень использования вместимости автобусов ( $K_{Np}$ ,  $K_{Kp}$ ,  $K_{Qb}$ ), суточным объемом перевозок на маршруте по билетно-учетным листам ( $Q_b$ ) и по наблюдениям ( $Q_o$ ), отношением количества перевезенных за сутки пассажиров по билетно-учетным листам к числу пассажиров, которое могло бы быть перевезено за эти же сутки при максимальном использовании вместимости каждый рейс ( $Q_b/(K_p \cdot V_{ср})$ ), отношением количества перевезенных за сутки пассажиров по наблюдениям к числу пассажиров, которое могло бы быть перевезено за эти же сутки при максимальном использовании вместимости каждый рейс ( $Q_o/(K_p \cdot V_{ср})$ ). Анализ вышеперечисленных независимых переменных, коррелирующих с окупаемостью,

показывает, что большинство из них зависит от вместимости автобусов (за исключением суточного объема перевозок на маршруте по билетно-учетным листам ( $Q_b$ ) и по наблюдениям ( $Q_o$ )). Поэтому, а также по причине непростого управления параметрами  $Q_b$  и  $Q_o$ , они были исключены из дальнейшего рассмотрения, что позволило оставить семь независимых переменных из девяти, у которых корреляция с окупаемостью оказалась значимой. При этом корреляция положительная для  $N_p$ ,  $K_p$ ,  $Q_b/(K_p \cdot V_{ср})$  и  $Q_o/(K_p \cdot V_{ср})$  и отрицательная для  $K_{Np}$ ,  $K_{Kp}$ ,  $K_{Qb}$ , т.е. можно сказать, что с ростом степени использования вместимости и снижением разброса между значениями степени использования вместимости окупаемость работы на маршруте растет. Анализ матриц корреляции показал, что существует значимая корреляционная связь между  $N_p$ ,  $K_p$ ,  $Q_b/(K_p \cdot V_{ср})$  и  $Q_o/(K_p \cdot V_{ср})$ , а также между  $K_{Np}$ ,  $K_{Kp}$ ,  $K_{Qb}$ , что может привести к мультиколлинеарности при дальнейшем построении регрессионных моделей. Кроме того, с точки зрения управления проще рассчитывать коэффициент пассажиронапряженности ( $K_p$ ) чем остальные шесть вышеперечисленных переменных. Это обусловлено тем, что для его расчета необходимо знать только максимальный пассажиропоток на перегоне за рейс и вместимость автобуса. Подбирая автобус нужной вместимости, можно относительно легко достичь наибольшего уровня степени ее использования. Учитывая вышеприведенное в качестве независимых параметров, оставлены коэффициент пассажиронапряженности ( $K_p$ ) и коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности ( $K_{Kp}$ ). При помощи нелинейного регрессионного анализа были получены формализованные зависимости  $O = f(K_p)$  и  $O = f(K_{Kp})$ .

С учетом полученных зависимостей было принято решение о «подстройке» вместимости пассажирских транспортных средств по существующую мощность пассажиропотока. Для этих целей предложено освоить выпуск модульных электробусов, позволяющих путем сцепления наращивать вместимость транспортной единицы в часы пик и путем отцепки снижать ее в периоды спада пассажиропотока.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки вида зависимостей  $O = f(K_p)$  и  $O = f(K_{Kp})$  построены соответствующие диаграммы рассеивания, приведенные на рисунке 1.

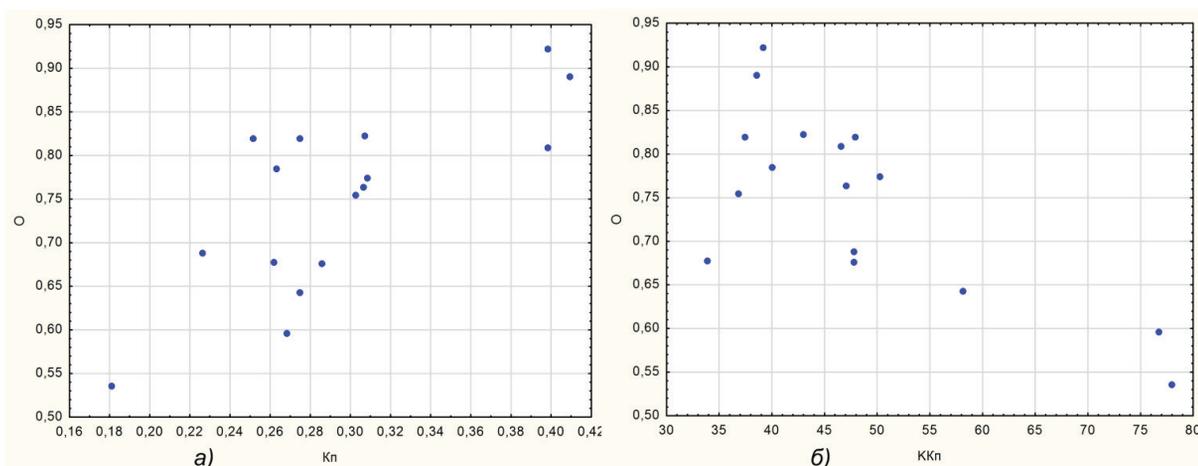


Рисунок 1 – Диаграммы рассеивания окупаемости работы на маршрутах в зависимости от коэффициента пассажиронапряженности (а) и коэффициента вариации значений коэффициента пассажиронапряженности (б)

Figure 1 – Diagrams of dispersion of the work payback on routes depending on the coefficient of passenger tension (а) and on the coefficient of values' variation of the passenger coefficient (б)

Из рисунка 1, а видно, что окупаемость растет с ростом степени использования вместимости. Из рисунка 1, б видна обратная связь между изучаемыми переменными: с ростом коэффициента вариации значений коэффициента пассажиронапряженности снижается окупаемость работы на маршруте.

Учитывая то, что коэффициент вариации случайной величины включает в себя математическое ожидание случайной величины, то совместное использование этих двух величин при проведении регрессионного анализа для установления их влияния на окупаемость работы на маршруте невозможно вследствие появления эффекта мультиколлинеарности. Поэтому были установлены уравнения регрессии вида  $O = f(Kп)$  и  $O = f(KKп)$  отдельно. В таблице 1 приведены результаты регрессионного анализа между переменными  $O$  и  $Kп$ , реализованного в [13].

Таблица 1  
Итоги регрессионного анализа между окупаемостью работы маршрута ( $O$ ) и коэффициентом пассажиронапряженности ( $Kп$ )

Table 1  
Results of the regression analysis between the payback of the route ( $O$ ) and the passenger coefficient ( $Kп$ )

N=16	Итоги регрессии для зависимой переменной: 1/ O (данные) R= ,77217134 R2= ,59624858 Скоррект. R2= ,56740919 F(1,14)=20,675 p<,00046 Станд. ошибка оценки: ,13780					
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	B	Ст.Ош. B	t(14)	p-знач.
Св.член			0,611834	0,169068	3,618851	0,002792
1/ $Kп$	0,772171	0,169822	0,213179	0,046884	4,546955	0,000456

Из таблицы 1 видно, что коэффициент корреляции равен 0,77, что говорит о высокой статистической связи между исследуемыми величинами. Коэффициент детерминации равен 0,596, т.е. почти 60% зависимой переменной объясняются значениями независимой переменной. Р-уровень для всей модели меньше 0,05, что говорит о ее статистической значимости. На рисунке 2 приведены результаты анализа остатков.

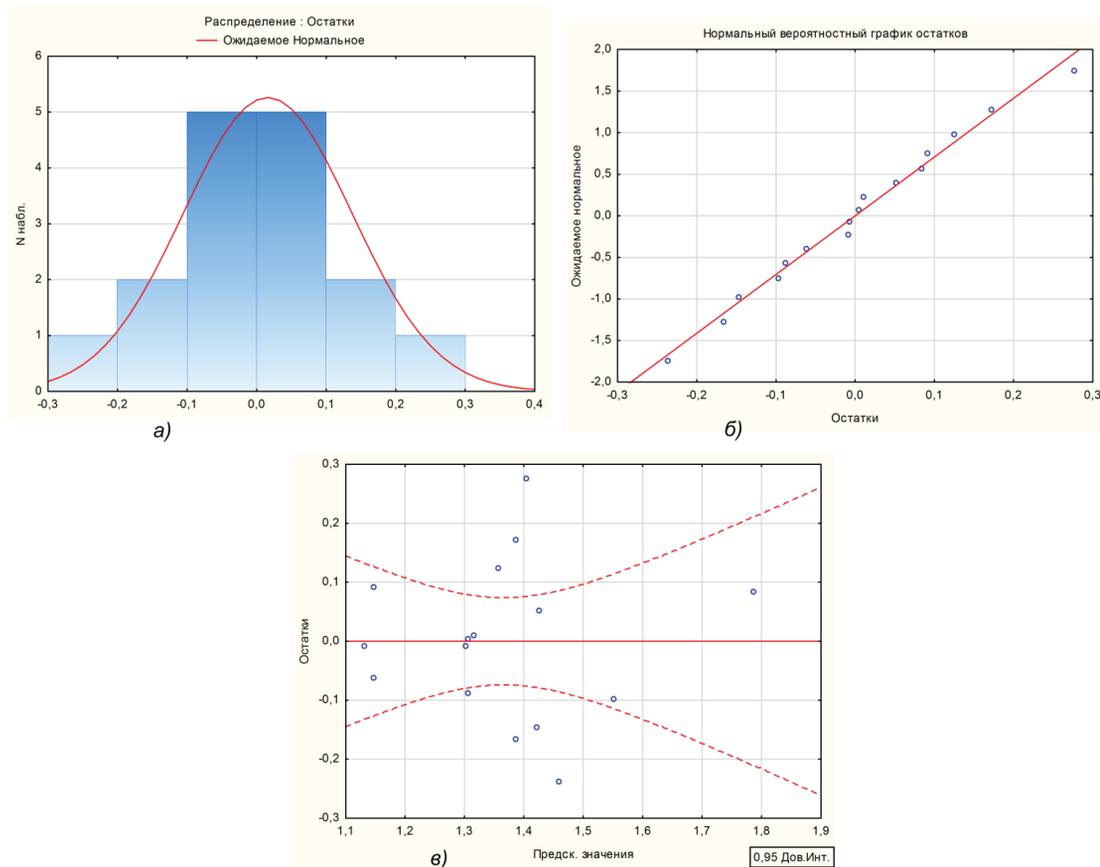


Рисунок 2 – Анализ остатков исследуемого уравнения регрессии: а – гистограмма распределения остатков; б – нормально-вероятностный график; в – зависимость остатков от предсказанных значений

Figure 2 – Analysis of the residues of the investigated regression equation: a – histogram of the residues' distribution; b – normal probabilistic graph; c – dependence of residuals on predicted values

Из рисунка 2, а видно, что гистограмма распределения остатков симметрична и ее форма схожа с нормальным законом распределения. Рисунок 2, б показывает, что систематических отклонений фактических данных от теоретической нормальной прямой не наблюдается, что говорит о нормальности распределения остатков. Из рисунка 2, в видно, что системности в расположении точек не наблюдается, что говорит о независимости остатков от предсказанных значений, т.е. анализ остатков говорит о высоком качестве построенной регрессионной модели.

Оценка приемлемости модели в целом (таблица 2) представляет уровень значимости меньше 0,05, что говорит о том, что модель приемлема и будет работать лучше прогноза по средним значениям.

Таким образом, полученная модель вида может использоваться для построения прогнозов. После приведения данного выражения в удобный вид можно получить

$$\frac{1}{O} = 0,611834 + 0,213179 \frac{1}{Kn} \quad (1)$$

$$O = \frac{1}{0,611834 + \frac{0,213179}{Kn}}$$

На рисунке 3 приведен график функции (1) и диаграмма рассеивания значений переменной O от переменной Kn.

Таблица 2  
Результаты дисперсионного анализа

Table 2  
Dispersion analysis' results

Эффект	Дисперсионный анализ; ЗП: 1/ О (данные)				
	Сумма квадр.	Степени свободы	Средн. квадр.	F	P-знач.
Регресс.	0,392616	1	0,392616	20,67480	0,000456
Остатки	0,265861	14	0,018990		
Итого	0,658477				

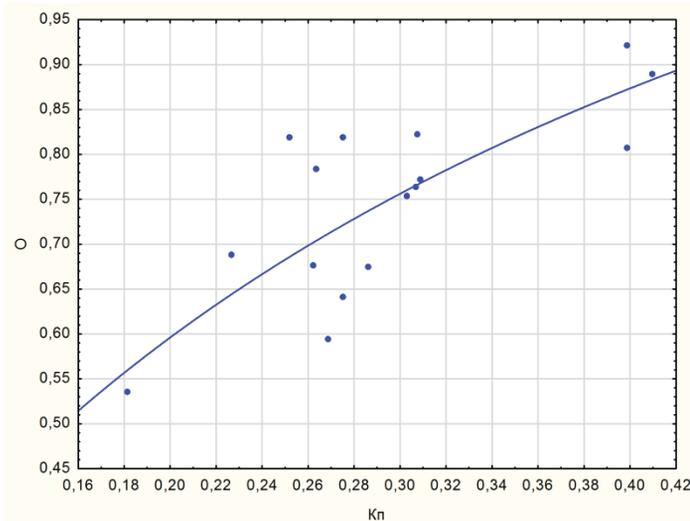


Рисунок 3 – Полученное уравнение регрессии и диаграмма рассеивания

Figure 3 – Resulting regression equation and dispersion diagram

При подстановке в уравнение (1) окупаемости равной 1 можно получить, что самоокупаемость работы общественного транспорта будет достигнута при коэффициенте пассажиронапряженности, равном 0,55.

Аналогично было получено для переменной ККп уравнение вида

$$O = 0,880479 - 0,000054KK_n^2 \quad (2)$$

На рисунке 4 показан график функции (2) и диаграмма рассеивания значений переменной O от переменной ККп.

Подстановка в выражение (2) окупаемости равной 1 дает комплексные решения и не дает вещественных. Это говорит о невозможности достигнуть самоокупаемости работы общественного пассажирского транспорта только за счет снижения разброса значений коэффициента пассажиронапряженности.

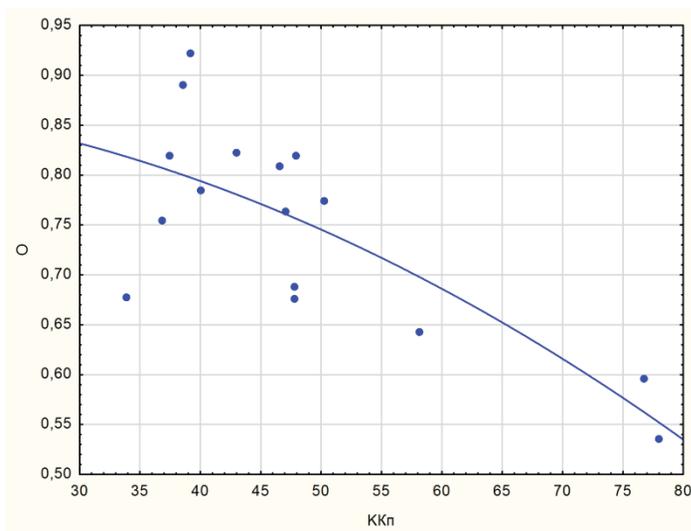


Рисунок 4 – Полученное уравнение регрессии и диаграмма рассеивания

Figure 4 – Resulting regression equation and dispersion diagram

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для повышения окупаемости работы общественного пассажирского транспорта необходимо разрабатывать мероприятия, позволяющие повысить коэффициент пассажиронапряженности и снизить его разброс относительно среднего. В качестве таких мероприятий предлагается создание производства модульных пассажирских транспортных средств (электробусов, автобусов, возможно, в перспективе беспилотных) и построение технологии их работы. Принципиально эта идея, в случае, когда известна мощность пассажиропотока на маршруте по часам суток, приведена на рисунке 5.

На рисунке 5 по оси абсцисс отложено время суток. По оси ординат – часовой пассажиропоток на маршруте. В верхней части рисунка приведена картограмма пассажиропотока по часам суток на маршруте, а в нижней части рисунка – необходимое количество модулей. Видно, что наличие парка из модулей электробусов одинаковой вместимости позволяет перевозчику более гибко подстраиваться под

существующую мощность пассажиропотока, повышая тем самым коэффициент пассажиронапряженности и уменьшая разброс его значений относительно среднего. Конечно же, повысить степень использования вместимости пассажирских транспортных средств можно, как это предлагается в работах [1, 2] путем закрепления автобусов различной вместимости по разным периодам суток за разными маршрутами с учетом мощности пассажиропотока на них. Однако это сопряжено с необходимостью иметь в парке различные модели, а иногда и марки пассажирских транспортных средств. Это в свою очередь приводит к дополнительным сложностям при их обслуживании, закупке запчастей и т.д., поэтому вариант парка одинаковых модулей смотрится предпочтительнее.

В случае, когда известна величина пассажиропотока на перегонах за каждый рейс, принципиальная схема работы модульных пассажирских транспортных средств приведена на рисунке 6.

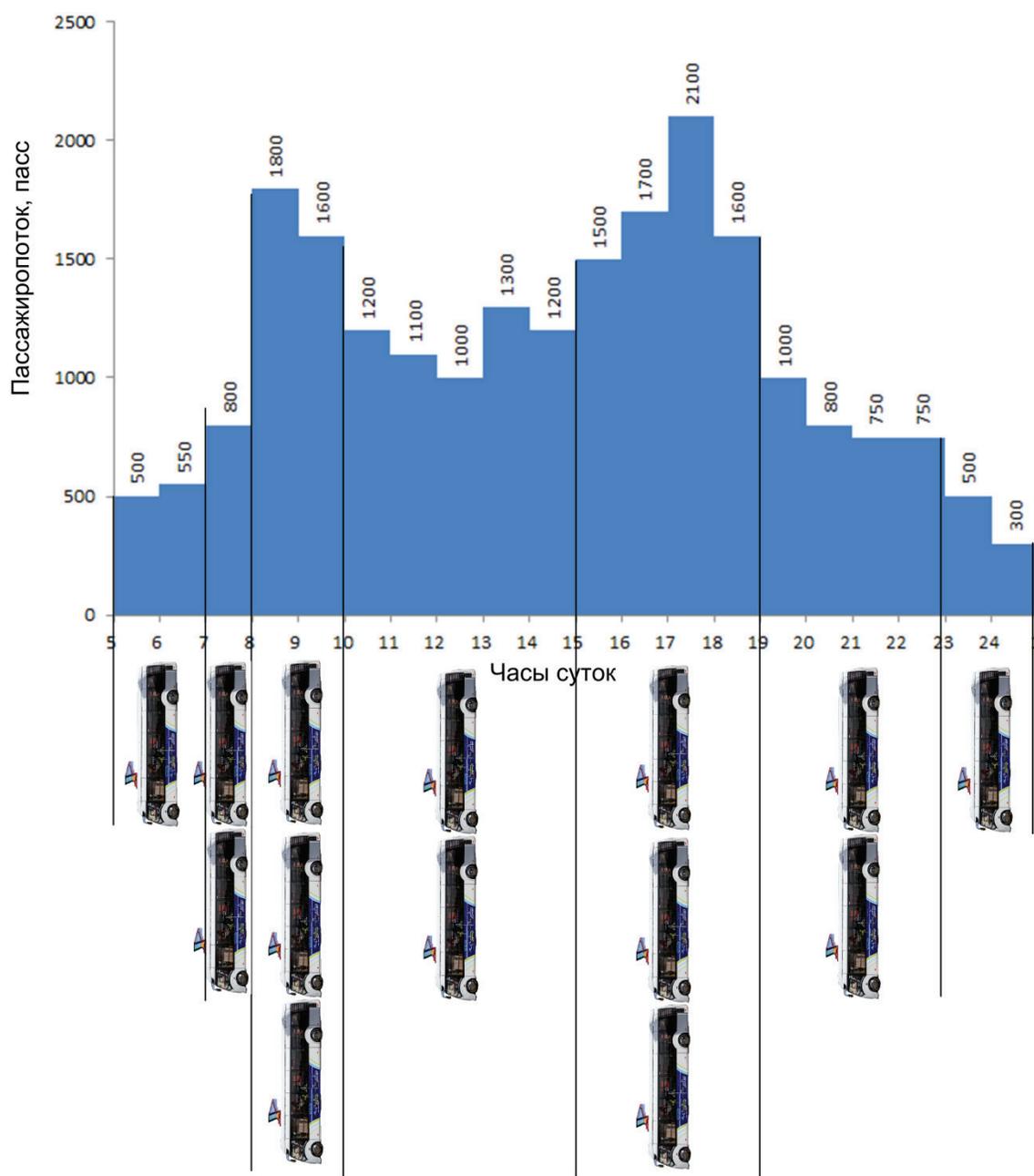
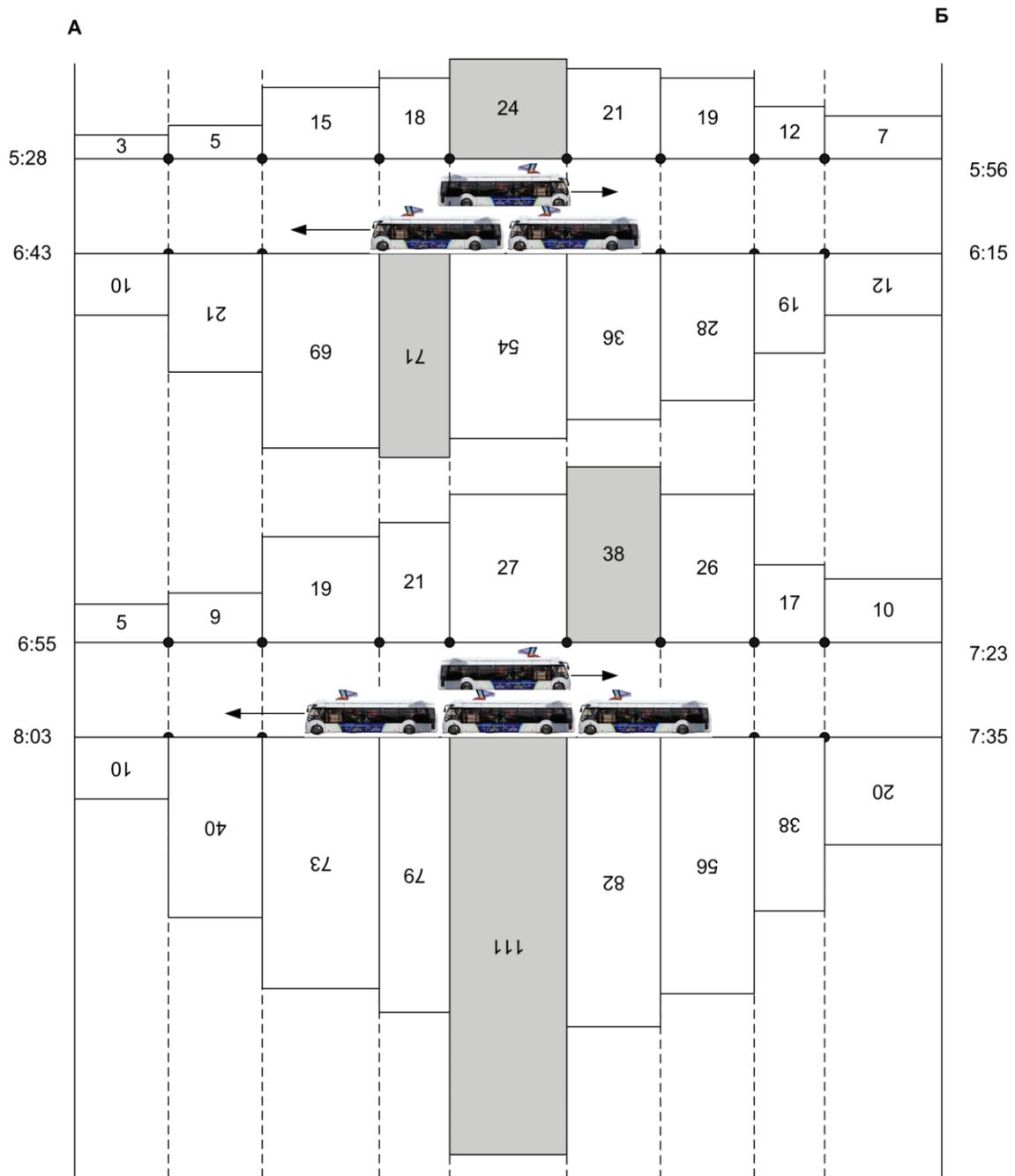


Рисунок 5 – Концептуальная схема работы модульных пассажирских транспортных средств на маршруте при известных часовых значениях пассажиропотока

Figure 5 – Conceptual diagram of the modular passenger vehicles' operation on the route with known hourly values of passenger traffic



- А, Б – конечные остановочные пункты маршрута
- – промежуточные остановочные пункты маршрута
- 5:28 – время отправления с начальной (прибытия на конечную) остановки маршрута
- 5 – количество пассажиров, проезжающих на перегоне маршрута
- 24 – пассажиронапряженность на маршруте за рейс

Рисунок 6 – Концептуальная схема работы модульных пассажирских транспортных средств на маршруте при известных значениях пассажиропотока по каждому рейсу

Figure 6 – Conceptual diagram of the modular passenger vehicles' operation on the route with known passenger flow values for each flight

На рисунке 6 изображены четыре рейса на маршруте между конечными остановочными пунктами А и Б. Первый рейс начинается в 5:28 и заканчивается в 5:56 утра. Максимальное количество пассажиров, перевозимое на перегоне (пассажиронапряженность) за рейс, равно 24. Если условно принять вместимость одного модуля 50 пассажиров, то для выполнения первого рейса достаточно одного модуля, как это и показано на рисунке 6. Время начала второго рейса 6:15, а окончания – 6:43. Пассажиронапряженность – 71 пассажир. Для выполнения этого рейса уже необходимо будет два модуля вместимостью 50 пассажиров. Аналогично из рисунка 6 видно, что для третьего рейса необходим один модуль, а для четвертого – три. Среднее значение коэффициента пассажиронапряженности за четыре рейса будет равно

$$Kn = \frac{24}{50} + \frac{71}{100} + \frac{38}{50} + \frac{111}{150} = 0,6725,$$

а коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности равен 19,326. Если же приведенные на рисунке 6 четыре рейса будет выполнять автобус МАЗ-105, вместимостью 160 пассажиров, то среднее значение коэффициента пассажиронапряженности за четыре рейса будет равно

$$Kn = \frac{24}{160} + \frac{71}{160} + \frac{38}{160} + \frac{111}{160} = 0,38125,$$

а коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности равен 63,47742.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна данной работы заключается в установлении влияния параметров наполняемости пассажирских транспортных средств на эффективность перевозочного процесса и на этой основе – предложении нового направления повышения эффективности работы городского общественного пассажирского транспорта – применение модульных пассажирских транспортных средств. Основываясь на примере, данном на рисунке 6, можно сделать вывод, что такое направление позволяет повысить коэффициент пассажиронапряженности на 76,4% и снизить коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности на 70%. Выражение (1) позволяет оценить эффективность применения модульных транс-

портных средств (см. рисунок 6). Так, с учетом формулы (1) окупаемость работы приведенных на рисунке 6 четырех рейсов при использовании автобуса постоянной вместимости 160 пассажиров составит 85,4%. Если же организовывать работы с применением модульных транспортных средств, то окупаемость составит 108%. Из рисунка 6 видно, что применение модульных пассажирских транспортных средств позволяет повысить окупаемость работы транспорта более на 26% и получить в итоге рентабельность от работы, равную 8%.

Таким образом, наличие парка из модулей пассажирских транспортных средств одинаковой вместимости позволяет перевозчику более гибко подстраиваться под существующую мощность пассажиропотока, повышая тем самым коэффициент пассажиронапряженности и уменьшая разброс его значений относительно среднего. Все это приводит к увеличению окупаемости работы общественного пассажирского транспорта.

Дальнейшие работы в данном направлении целесообразно сосредоточить на обосновании вместимости модуля, разработки технологии осуществления перевозки пассажиров модульными транспортными средствами, формулировании технических требований к конструкции модуля.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Traveling heterogeneity in public transportation / Caio Ponte [and other] // URL: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6> (дата обращения: 15.08.2019).
2. Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport / N.Adra, J.L.Michaux, Michel Andre // Artemis - assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. Rapport de recherche. 2004, 31p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/277183200\\_Analysis\\_of\\_the\\_load\\_factor\\_and\\_the\\_empty\\_running\\_rate\\_for\\_road\\_transport\\_Artemis\\_assessment\\_and\\_reliability\\_of\\_transport\\_emission\\_models\\_and\\_inventory\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems) (дата обращения: 16.08.2019).
3. Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time. [https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo\\_factors.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf).
4. Azemsha S. The Study of the Trolley Buses Occupancy // Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management. 2019. Volume 19 Issue 1. P. 6–15. [https://globaljournals.org/GJM BR\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJM BR_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).

5. Аземша С.А. Оценка неравномерности использования вместимости общественного пассажирского транспорта // Логистический аудит транспорта и цепей поставок: материалы II Международной научно-практической конференции (26 апреля 2019 г.) / отв. редактор С.А. Эртман. Тюмень: ТИУ, 2019. 460 с. С. 16–23.

6. Скиркоцкий С.В. Исследование влияния факторов на результативность работы городского пассажирского маршрутизированного транспорта // Вестник Белорус. гос. ун-та трансп.: Наука и транспорт. 2017. № 1(34). С. 30–35.

7. Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава / Гозбенко [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 203–208.

8. Шлиппе И.И., Оганесян Т.С. Анализ условий формирования и развития рынка пассажирских перевозок городским автобусным транспортом // Вестник Московского. гос. ун-та : Сер. 6. Экономика. 2017. № 1. С. 86–99.

9. Ковалев Р.Н., Степанов А.С., Черницын С.А. Исследование эффективности муниципальных автобусных маршрутов (на примере г. Екатеринбург) // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4.

10. Гавриков В.А., Пеньшин Н.В., Анохин С.А. Социально-экономические проблемы организации работы городского общественного транспорта // Глобальный научный потенциал. Экономика и управление. 2019. № 3 (96). С. 125–129.

11. Белокуров В.П., Мотузка Д.А., Артемов А.Ю. Повышение эффективности эксплуатации автотранспорта при осуществлении сезонных пассажирских перевозок в городах курортных зон // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 3 (19). С. 25–33.

12. Григорова Т.М., Давидіч Ю.О., Доля В.К. Оцінка еластичності попиту на послуги Приміського пасажирського автомобільного транспорту. – Technology audit and production reserves – № 3/2 (23), 2015. С. 13–16.

13. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

### REFERENCES

1. Traveling heterogeneity in public transportation / Caio Ponte [and other] // URL: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6>.

2. Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport / N.Adra, J.L.Michaux, Michel Andre // Artemis - assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. Rapport de recherche. 2004, 31p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/277183200\\_Analysis\\_of\\_the\\_load\\_factor\\_and\\_the\\_empty\\_running\\_rate\\_for\\_road\\_transport\\_Artemis\\_assessment\\_and\\_reliability\\_of\\_transport\\_emission\\_models\\_and\\_inventory\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems).

3. Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time. [https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo\\_factors.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf).

4. Azemsha S. The Study of the Trolley Buses Occupancy // *Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management*. 2019; 19 Issue 1: 6–15. [https://globaljournals.org/GJMBR\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJMBR_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).

5. Azemsha S.A. Ocenka neravnomernosti ispol'zovanija vmestimosti obshhestvennogo passazhirskogo transporta [Assessment of uneven use of public passenger transport capacity]. *Logisticheskij audit transporta i cepej postavok: materialy II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (26 aprelja 2019 g.)* / отв. редактор С.А. Jertman. Tjumen': TIU, 2019: 460 P. Pp. 16–23.

6. Skirkovskij S.V. Issledovanie vlijanija faktorov na rezul'tativnost' raboty gorodskogo passazhirskogo marshrutizirovannogo transporta [Study of the influence of factors on the performance of urban passenger routed transport]. *Vestnik Belorus. gos. un-ta transp.: Nauka i transport*. 2017; 1(34): 30–35.

7. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya transportnoj seti gorodskogo passazhirskogo transporta putem primenenija avtomatizacii modeli vybora optimal'nogo podvizhnogo sostava. Gozbenko [i dr.] [Improving the efficiency of the urban passenger transport network by using automation of the selection of optimal rolling stock model]. *Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie*. 2017; 2 (54): 203–208.

8. Shlippe I.I., Oganesejan T.S. Analiz uslovij formirovaniya i razvitija rynka passazhirskih perevozkov gorodskim avtobusnym transportom [Analysis of conditions of the passenger transport market formation and development by bus transport]. *Vestnik Moskovskogo. gos. un-ta: Ser. 6. Jekonomika*. 2017;1: 86–99.

9. Kovalev R.N., Stepanov A.S., Chernicyn S.A. Issledovanie jeffektivnosti municipal'nyh avtobusnyh marshrutov (na primere g. Ekaterinburga) [Study of efficiency of municipal bus routes (on the example of Yekaterinburg)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2014; 4.

10. Gavrikov V.A., Pen'shin N.V., Anohin S.A. Social'no-jekonomicheskie problemy organizacii raboty gorodskogo obshhestvennogo transporta [Socio-economic problems of the urban public transport organization]. *Global'nyj nauchnyj potencial. Jekonomika i upravlenie*. 2019; 3 (96): 125–129.

11. Belokurov V.P., Motuzka D.A., Artemov A.Ju. Povyshenie jeffektivnosti jekspluatatsii avtotransporta pri osushhestvlenii sezonnyh pas-sazhirs'kih perevozok v gorodah kurortnyh zon [Improving the efficiency of motor transport operation during seasonal passenger transport in the resort zones' cities]. *Tehnologija kolesnyh i gusenichnyh mashin*. 2015; 3 (19): 25–33.

12. Grigorova T.M., Davidich Ju.O., Dolja V.K. Ocinka elastichnosti popitu na poslugi Primis'kogo pasazhirs'kogo avtomobil'nogo transport [Estimation of elasticity for the servants of the Primorsk passenger transport]. *Technology audit and production reserves*. 2015; 3/2 (23):13–16.

13. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

**Поступила 30.09.2018, принята к публикации 25.10.2019.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

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

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта, заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением», (246022, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, 34, s-azemsha@yandex.ru).*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Sergey A. Azemsha – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Road Transport and Traffic Management Department, Belarusian State University of Transport (246022, Republic of Belarus, Gomel, 34, Kirov St., s-azemsha@yandex.ru).*

## АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (ОБЗОР)

А.В. Белякова\*, Б.В. Савельев  
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,  
г. Омск, Россия  
\*alek-belyakova@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Организация качественной подготовки водителей транспортных средств возможна только при правильном формировании профессиональных навыков. Формирование навыков, необходимых водителю для надежного управления автомобилем, возможно путем использования тренажеров на начальном этапе подготовки. Применение тренажеров позволяет автоматизировать действия, которые совершает водитель при управлении автомобилем, при этом не подвергая самого обучаемого рискам. Цель статьи – анализ современного состояния в области применения тренажеров при подготовке водителей транспортных средств.

**Материалы и методы.** В статье даны основные психофизиологические принципы процесса обучения, которые должны быть учтены при применении тренажеров для подготовки водителей. Представлена классификация автомобильных тренажеров, используемых для обучения водителей автомобилей, по соответствию их информационных моделей информации, воспринимаемой водителем в процессе управления автомобилем. Существующие информационные модели тренажеров в обобщенном виде можно разделить на две группы: первая, в которой воспроизводится только визуальная информация, без имитации вестибулярной, и вторая, в которой имитируется как визуальная, так и вестибулярная информация. Проведен анализ информационных моделей существующих тренажеров, отражены их достоинства и недостатки.

**Результаты.** Для представленной классификации информационной модели тренажеров предложены два систематизирующих признака, а именно угол обзора предъявляемой визуальной информации и наличие имитации вестибулярной информации.

**Обсуждение и заключение.** Проведенное исследование может быть полезно не только для дальнейшего развития науки в данной области, но и для выбора тренажеров при организации учебного процесса в автошколах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** обучение водителей, навык, тренажер, информационная модель, визуальная информация, вестибулярная информация, угол обзора.

© А.В. Белякова, Б.В. Савельев



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# SIMULATORS FOR TRAINING OF VEHICLES' DRIVERS: INFORMATION MODELS' ANALYSIS (REVIEW)

**A.V. Belyakova\*, B.V. Saveliev**

Siberian State Automobile and Highway University,  
Omsk, Russia

\*alek-belyakova@yandex.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** Organization of high-quality training of the vehicles' drivers is possible only with the proper formation of professional skills. Moreover, the formation of the skills is necessary for the driver to control the vehicle safety, perhaps by using simulators at the initial stage of training. The use of simulators allows automating the actions that the driver performs, while not exposing the student to risks. Therefore, the purpose of the paper is to analyze the application of simulators in the training of the vehicles' drivers.

**Materials and methods.** The paper presented the basic psycho physiological principles of the learning process, which should be taken into account when using simulators for driver training. The authors demonstrated the classification of the car simulators used for training of drivers by the information models. Existing information models of simulators were divided into two groups: reproducing only visual information, without imitation of the vestibular and simulating both visual and vestibular information. The analysis reflected the advantages and disadvantages of information models.

**Results.** As a result, the authors proposed two systematizing features: the view angle of the visual information and the simulation of vestibular information.

**Discussion and conclusions.** The research is useful not only for the further science development, but also for the selection of simulators and for the organization of the educational process in driving schools.

**KEYWORDS:** driver training, skill, simulator, information model, visual information, vestibular information, angle observation.

© A.V. Belyakova, B.V. Saveliev



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

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ аварийности показывает, что значительная часть дорожно-транспортных происшествий происходит по вине молодых и начинающих водителей, обладающих низкой квалификацией [1].

Одним из путей повышения безопасности дорожного движения является организация качественной подготовки кандидатов в водители транспортных средств. В процессе обучения у водителя должна быть сформирована система знаний, умений и навыков, которые бы позволяли ему безошибочно с минимальной затратой сил управлять автомобилем при любых дорожных условиях, в любое время суток.

Профессиональные знания – это информация в форме образов и понятий, которые обучаемый усваивает (накапливает) в ходе проведения теоретических занятий. Однако эффективность и надежность действий водителя будут зависеть не только от имеющейся у него системы теоретических знаний, но и от точности, своевременности и правильности действий, совершаемых им при управлении автомобилем. Действия, выполняемые легко, быстро, с наилучшим результатом, с минимальным количеством ошибок и при отсутствии физического и психологического напряжения, доведенные до определенной степени автоматизма, называются навыками.

Формирование навыков, необходимых водителю для надежного управления автомобилем, происходит на практических занятиях путем многократного повторения определенных упражнений, предусмотренных программой подготовки водителей, на учебном автомобиле и (или) тренажере [2]. Авторы статьи, ни в коей мере не уменьшая роли практических занятий на учебных автомобилях, хотят подчеркнуть важность тренажерной подготовки для выработки основных, прежде всего дви-

гательных (моторных) навыков, связанных с управлением автомобилем<sup>1</sup> [3, 4].

Тренажер – это техническое средство, предназначенное для профессиональной подготовки операторов системы «человек–машина» (в нашем случае водителей автомобилей), отвечающее требованиям методик подготовки, реализующее модель системы «человек–машина», в частности системы «водитель–автомобиль», и обеспечивающее контроль качества деятельности обучаемого<sup>2</sup>.

Автомобильным тренажером называется комплекс устройств, предназначенных для подготовки и тренировки водителей автомобилей и состоящих из элементов, моделирующих рабочее место водителя и дорожную обстановку<sup>3</sup>.

Основными достоинствами подготовки водителей с использованием тренажеров являются следующие:

- функциональность, т.е. возможность отработки только одного, конкретного навыка (например, навыка поворота рулевого колеса или навыка плавного выполнения торможения);

- возможность имитации отказов и неисправностей, которые могут возникнуть в системе «водитель–автомобиль» и проверке правильности действий обучаемого в этих ситуациях без каких-либо для него рисков;

- возможность проведения групповых тренировок;

- возможность регистрации всех действий обучаемого как с точки зрения безошибочности, так и своевременности<sup>4</sup>.

При этом тренажеры, используемые в учебном процессе, применяются только для первоначального обучения навыкам вождения: отработки правильной посадки водителя в транспортном средстве и пристегивания ремнем безопасности; ознакомления с органами управления, контрольно-измерительными приборами; отработки начальных приемов управления транспортным средством<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Фокина Н.А., Щеглов А.А., Дудкин Ю.А. Опыт использования имитационных технологий при подготовке водителей транспортных средств в вузах МВД России. В сборнике : Актуальные проблемы огневой, тактико-специальной и профессионально-прикладной физической подготовки. Сборник статей. Ответственный редактор Ю.А. Матвейчев. 2016. С. 115–121.

<sup>2</sup> ГОСТ 26387–84 «Система «человек–машина». Термины и определения. Введ. 1984.12.20. М. : Госстандарт России : Стандартинформ, 2005. 6 с.

<sup>3</sup> Клебельсберг, Д. Транспортная психология = Verkehrspsychologie / Klebelsberg ; под ред. В.Б Мазуркевича. М. : Транспорт, 1989. 367 с. ISBN 0-387-11713-X.

<sup>4</sup> Основы инженерной психологии : учебник / ред. Б.Ф. Ломов. М. : Высшая школа, 1986. 447 с.

Цель статьи – анализ современного состояния в области применения тренажеров при подготовке водителей транспортных средств.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективность применения тренажеров для подготовки водителей может быть повышена, если будут учтены основные психофизиологические принципы процесса обучения, а именно:

1) навыки, формируемые на тренажере по своему строению должны быть такими же, как навыки, развиваемые при управлении автомобилем [5];

2) тренажер не должен вырабатывать навыков, которые развивают негативные действия при переходе на автомобиль;

3) информационная модель, реализуемая в тренажере, должна обеспечивать максимально близкий пример реальному процессу управления автомобилем, т.е. с высокой достоверностью имитировать дорожную обстановку, реакцию на органы управления, средства отображения информации. Информационная модель – условное отображение информации о состоянии объекта управления (автомобиля), системы «человек–машина» и способов управления ими;

4) тренажер должен обеспечивать обучаемому возможность воспринимать результаты своих действий, т.е. обеспечивать адекватную обратную связь. Обратная связь – это поток информации о результатах управляющих воздействий водителя, предъявляемый ему через информационную модель<sup>6</sup>.

Применение компьютерных технологий позволяет проектировать автомобильные тренажеры с учетом рассмотренных выше психофизиологических принципов и без недостатков, которые были присущи автомобильным тренажерам, используемых для обучения водителей в 70–80 гг. прошлого века<sup>7, 8</sup>.

Конструкция современных компьютерных тренажеров различается большим разнообразием: от простых симуляторов до динамических специализированных тренажеров [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Классифицировать современные автомобильные тренажеры авторы предлагают по характеру информационной модели.

Информационная модель тренажеров для правильного развития навыков должна воспроизводить:

1) визуальную информацию о положении и скорости движения автомобиля на дороге;

2) вестибулярную информацию о линейных и угловых ускорениях (замедлениях) автомобиля<sup>9</sup>.

Для обеспечения водителей визуальной информацией с помощью оптико-аппаратно-программных комплексов проектируется трехмерная модель автодрома и/или улично-дорожной сети, включая других участников движения, которая предъявляется обучаемому на экране(ах) монитора(ов) [13, 14, 15, 16].

Основным способом имитации вестибулярной информации в существующих тренажерах является использование динамических платформ или стенов, которые наклоняются (поворачиваются) в сторону действия силы, вызывающей ускорение (замедление) автомобиля [17].

При этом именно моделирование линейных и угловых ускорений автомобиля является наиболее сложной с технической точки зрения задачей.

Весь представленный спектр тренажеров условно можно разделить на две группы (рисунок 1):

1) компьютерные автомобильные тренажеры, воспроизводящие только визуальную информацию, без имитации вестибулярной;

2) компьютерные автомобильные тренажеры, имитирующие и визуальную, и вестибулярную информацию [9, 10].

<sup>5</sup> Приказ Министерства образования и науки РФ от 26 декабря 2013 г. N 1408 «Об утверждении примерных программ профессионального обучения водителей транспортных средств соответствующих категорий и подкатегорий» (с изменениями на 19 октября 2017 года) : утв. М-вом

<sup>6</sup> Основы инженерной психологии : учебник / ред. Б. Ф. Ломов. М. : Высшая школа, 1986. 447 с.

<sup>7</sup> Гуслиц, В.С. Автомобильные тренажеры / В.С. Гуслиц, Н.А. Игнатов, В.А. Иларионов. М. : Транспорт, 1975. 96 с.

<sup>8</sup> Иларионов, В. А. Технические средства обучения водителей / В.А. Иларионов, М.В. Кошелев, В.М. Мишуринов. М. : ДОСААФ, 1979. 159 с.

<sup>9</sup> Применение автомобильного модульного тренажерного комплекса при подготовке водителей. Подуремья А.В., Заварзин А.Т., Щербатов Е.Д. В сборнике : Наука, образование и инновации в современном мире. Материалы национальной научно-практической конференции. 2018. С. 83–88.



Рисунок 1 – Классификация тренажеров

Figure 1 – Classification of simulators

Компьютерные автомобильные тренажеры, в которых воспроизводится только визуальная информация

Тренажеры, в которых воспроизводится только визуальная информация, можно разделить на две подгруппы: симуляторы и тренажеры с полноценным рабочем местом (см. рисунок 1).

Термин симулятор (или автомобильный симулятор, сокращенно автосимулятор) заимствован из современной западной литературы. Под симуляторами<sup>10</sup> понимаются компьютерные имитаторы, моделирующие управление каким-либо процессом, аппаратом или транспортным средством [12, 13]. Чаще всего сейчас термин «симулятор» используется применительно к компьютерным программам, имитирующим движение автомобиля, в которых управление осуществляется при помощи специальной игровой приставки [12].

Содержание информационных моделей, используемых в симуляторах, зачастую не публикуется в известных авторам научных источниках, что не позволяет произвести оценку качества симуляторов с точки зрения адекватности навыков, формируемых при их использовании.

В конструкцию тренажера с полноценным рабочим местом входит комплекс устройств, включающих водительское кресло, со всеми органами управления, средствами ото-

бражения информации и вспомогательным оборудованием, аналогичных тем, что устанавливаются на реальных автомобилях, предназначенных для осуществления деятельности водителя.

Тренажеры данной группы позволяют сформировать первоначальные (моторные) навыки по управлению автомобилем и обеспечивают закрепление теоретических знаний, путем моделирования различных дорожно-транспортных ситуаций [9, 10, 11].

Такие тренажеры обычно состоят из трех модулей (рисунок 2):

1) модуль, с полноценным рабочим местом водителя;

1) аппаратно-программный модуль – это персональный компьютер, с программным обеспечением и устройством согласования, обеспечивающего совместную работу датчиков органов управления тренажера и компьютера;

2) визуально-акустический модуль, состоящий из монитора(ов), с помощью которых моделируется визуальная информация из акустических колонок, которые воспроизводят основные шумы, возникающие при движении автомобиля (шум обгоняемых автомобилей, визг шин при торможении и т.д.), а также акустические характеристики работы различных агрегатов и систем автомобиля (звук пуска двигателя).

<sup>10</sup> Англо-русский словарь по вычислительной технике и программированию (The English-Russian Dictionary of Computer Science) : около 55 тыс. статей. 8-е изд., испр. и доп. © АBBYY, 2008; © Масловский Е.К., 2008.



*а – имитация визуальной информации на 1-м мониторе, угол обзора 30–40°<sup>11</sup>  
а – imitation of visual information on the 1 monitor, the viewing angle of 30–40°*

*б – имитация визуальной информации на 3-х мониторах, угол обзора 150–180°<sup>12</sup>  
b – imitation of visual information on 3 monitors, viewing angle of 150–180°*



*в – имитация визуальной информации с помощью панорамного монитора, угол обзора 150–180°<sup>13</sup>  
с – simulation of visual information using a panoramic monitor, viewing angle of 150–180°*



*г – имитация визуальной информации с помощью диспаратных очков<sup>14</sup>  
d – simulation of visual information using disparate glasses*

Рисунок 2 – Тренажеры с имитацией рабочего места водителя

Figure 2 – Simulators of the driver's workplace

<sup>11</sup> Автотренажер. Производство и продажа тренажеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://auto-trener.ru> (дата обращения: 17.07.2019).

<sup>12</sup> Там же.

<sup>13</sup> Forward. Симуляторы, автотренажеры, тренажеры спецтехники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autotrenajer.ru> (дата обращения: 17.07.2019).

<sup>14</sup> Там же.

Использование информационных технологий (компьютерная программа) тренажеров позволяет:

– осуществлять подготовку водителей по отработке первоначальных навыков управления путем выполнения испытательных упражнений («остановка и начало движения на подъеме»; «разворот в ограниченном пространстве»; «въезд в бокс задним ходом»; «параллельная парковка»; «змейка»; «повороты на 90 градусов»).

– формировать навыки вождения в городской среде и по загородным трассам (своевременное реагирование на сигналы светофора и дорожные знаки, управление автомобилем в плотном потоке машин, проезд перекрестков и т.п.).

– совершать контроль со стороны инструктора за действиями обучаемого путем анализа статистики ошибок каждого из учеников на протяжении всего курса обучения, в том числе при выполнении групповых упражнений [9, 10, 11].

Различаются тренажеры данного типа только способом предъявления визуальной информации.

Самым простым является вариант, когда обучаемому на один плоский монитор предъявляется картинка, представляющая из себя искусственно сформированное визуально наблюдаемое виртуальное пространство (рисунок 2,а) с углом обзора в горизонтальной плоскости 30–40° [18].

Основными преимуществами данных тренажеров являются:

- 1) надежность (срок службы 8–10 лет);
- 2) компактность (площадь размещения не более 10 м<sup>2</sup>);
- 3) относительно невысокая стоимость (не дороже стоимости учебного автомобиля).

Поэтому тренажеры данного типа чаще всего используются для обучения в автошколах.

Для имитации визуальной информации используются псевдообъемные системы моделирования наблюдаемого изображения местности, так называемые 3D-модели 3D-графика (рисунок 3) [18]. Во всех таких системах с помощью экранов формирования промежуточного изображения моделируются двухмерные проекции трехмерных объектов, которые за-

тем зрительным аппаратом человека преобразуются в иллюзию наблюдения трехмерного объекта [19, 20].

При моделировании проектируется вся окружающая водителя дорожная обстановка (дорога, тротуары, перекрестки, сооружения и здания, заборы, деревья и кустарники, попутный и встречный транспорт, средства организации дорожного движения, пешеходы и т.д.), что позволяет добиться высокой степени достоверности по качеству, сравнимому с изображениями, полученными при использовании видеокамер (см. рисунок 3) [19, 20]. Однако стоимость имитации визуальной информации составляет до 90% от стоимости самого тренажера [19].

Основным недостатком данных тренажеров является то, что объемное изображение проецируется на плоский монитор, а не на сферическую поверхность, концентричную сетчатке глаза. Поэтому появляется искажение границ поля зрения, а информация, воспринимаемая периферийным зрением, не моделируется вовсе, тогда как при выполнении различных маневров в реальных условиях водитель контролирует положение автомобиля, используя угол обзора не менее 180°. Например, водители общественного транспорта точность остановки автобуса или троллейбуса контролируют через боковое стекло, используя периферийное зрение (рисунок 4).

Этот недостаток устраняется путем установки вместо обычного монитора трех широкоформатных мониторов или панорамного монитора, обеспечивающих водителю угол обзора в горизонтальной плоскости от 150° до 180° (рисунок 2, б, в).

Однако данная визуальная информационная модель тоже имеет свои недостатки. Дело в том, что при таком способе предъявления информации на монитор выводится изображение дороги не ближе 4–80 м от передней части автомобиля [18, 19, 20].

Наличие «мертвой зоны» между глазом обучаемого и первой, ближайшей к нему модели трехмерного объекта, не позволяет формировать навыки, связанные с определением расстояния до движущихся объектов или между движущимися объектами во времени, что имеет важное значение для профессионального мастерства водителя [18, 19, 20].



Рисунок 3 – Примеры имитации визуальной информации на тренажерах<sup>15</sup>

Figure 3 – Examples of simulating visual information on simulators



Рисунок 4 – Остановка при движении у выбранного ориентира параллельно тротуару (вид с места водителя)

Figure 4 – Stop while driving at the selected landmark parallel to the sidewalk (driver's seat view)

Для решения этой проблемы производители тренажеров предлагают использовать визуальную систему с диспаратными очками (стереочки, виртуальный шлем, стереодисплей) – это система, позволяющая достичь стереоэффекта, ощущение протяжённости пространства и рельефности местности. Данный эффект достигается путем моделирования каждому глазу человека своего изображения, синтезированного с учетом расположения этого глаза в пространстве (рисунок 2, г). Преимуществом системы с диспаратными очками является отсутствие «мёртвой зоны», недостатком – значительное число обучаемых

первоначально должны научиться видеть такую модель, а также удорожание подобных тренажеров вследствие необходимости использования дополнительного оборудования [18, 19, 20].

Главным недостатком компьютерных автомобильных тренажеров без имитации вестибулярной информации является то, что в них не моделируются линейные и угловые ускорения (замедления), которые испытывает водитель при управлении реальным автомобилем, а это в свою очередь не позволяет сформировать следующие навыки: остановку в заданном месте с применением плавного торможения,

<sup>15</sup> Автотренажер. Производство и продажа тренажеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://auto-trener.ru> (дата обращения: 17.07.2019).

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

выбора оптимального ускорения автомобиля, управления транспортным средством при прохождении поворотов различного радиуса.

Автомобильные тренажеры, имитирующие визуальную и вестибулярную информацию

Основным отличительным признаком тренажеров данной группы является наличие системы имитации вестибулярной информации. Имитация линейных и угловых ускорений в таких тренажерах реализуется путем использования в их конструкции различного вида динамических платформ или стенов [21].

Под динамическим стендом тренажера (или динамический стенд) понимается устройство, предназначенное для перемещения кабины тренажера в пространстве<sup>16</sup>.

Основная группа автомобильных тренажеров, в которых используются различного вида динамические стеноды, спроектированы на базе кабин автомобиля (рисунок 5).

Информационная модель таких тренажеров отличается большей адекватностью реальному процессу движения, чем тренажеры, не имеющие системы имитации вестибулярной информации<sup>17</sup> [22].

В состав таких тренажеров входят следующие модули:

1) кабина автомобиля, моделирующая полноценный интерьер рабочего места водителя, с активной панелью приборов;

2) визуально-акустический модуль, состоящий из панорамного монитора и акустической системы;

3) аппаратно-программный модуль;

4) динамическая платформа, имитирующая ускорения, испытываемые водителем при разгоне, торможении и повороте, а также неровность дорожного покрытия и вибрации двигателя [23].

Преимуществами такого вида тренажеров являются:

– полноценный интерьер рабочего места водителя позволяет сформировать навык работы не только с основными органами управления автомобиля (рулевое колесо, педальный узел, рычаг коробки передач и стояночный тормоз), но и с дополнительными (рычаги управления системой отопления и вентиляции и т.д.);



а – Тренажер автомобиля КамАЗ<sup>18</sup>  
а – Simulator of KAMAZ



б – Тренажер вождения легковых автомобилей<sup>19</sup>  
b – Passenger car driving simulator

Рисунок 5 – Автомобильные тренажеры на базе реальных кабин автомобилей

Figure 5 – Car simulators on the basis of the actual vehicle's cabs

<sup>16</sup> ГОСТ 21659–76 «Тренажеры авиационные. Термины и определения». Введ. 1977.07.01. М. : Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1978. 8 с.

<sup>17</sup> Зверев Ю.В., Спиридонов Е.Г. Обучение водителя транспортного средства с помощью электронных систем. Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 2015. Издательство : Автомобильно-транспортный институт (Воронеж). С. 66–74.

<sup>18</sup> Forward. Симуляторы, автотренажеры, тренажеры спецтехники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autotrenajer.ru> (дата обращения: 17.07.2019).

<sup>19</sup> Тренажеры вождения легковых автомобилей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://logos-sim.com/ru> (дата обращения: 17.07.2019).

– панорамный экран, мониторы для обзора через зеркала заднего вида, а также наличие системы, позволяющей определять положение головы водителя для формирования визуальной информации, с учетом перемещения точки наблюдения обеспечивают максимальное приближение условий обучения к условиям работы водителя реального автомобиля;

– использование динамической платформы позволяет имитировать изменения скорости движения в различном диапазоне, движение по инерции, движение на подъемах и спусках, торможение рабочей тормозной системой, а также двигателем или комбинированным способом, угловые ускорения, воздействующие на водителя при прохождении поворотов;

– инструктор имеет возможность проводить автоматическую фиксацию допускаемых ошибок, выставлять оценки за выполненные упражнения, формировать базы данных о результатах обучаемых;

– имеется возможность работы как отдельного рабочего места обучаемого, так и в составе учебного класса, с объединением нескольких тренажеров и одного рабочего места инструктора.

В настоящее время все большее применение в составе тренажеров получают шестиступенные динамические платформы или стенды на основе гексапода, такие платформы имеют повышенную подвижность и могут имитировать кроме угловых ускорений еще вращательное движение вокруг вертикальной оси, а также линейные ускорения в вертикальной, продольной и поперечной плоскостях [24, 25].

Основными недостатками таких тренажеров являются:

- сложность и громоздкость конструкции;
- отсутствие мобильности;
- необходимость больших площадей;
- потребность периодического технического обслуживания силовых агрегатов;
- большое потребление электроэнергии;
- высокая стоимость (больше стоимости учебного автомобиля).

Поэтому приобретать такие тренажеры могут только крупные автошколы и учебные центры, тогда как частные автошколы не имеют возможности для их установки и приобретения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом работы авторы считают классификацию автомобильных тренажеров, используемых для обучения водителей автомобилей, по соответствию их информационных моделей информации, воспринимаемой водителем в процессе управления автомобилем.

В качестве классификационных приняты следующие признаки:

- 1) угол обзора предъявляемой визуальной информации;
- 2) наличие имитации вестибулярной информации.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Информационные модели тренажеров низкобюджетной группы имитируют достаточно условную визуальную информацию о дорожной обстановке с углом обзора в горизонтальной плоскости 30–40°.

2. Информационные модели тренажеров, обеспечивающих визуальную информацию с углом обзора в горизонтальной плоскости 150–180° более приближены к реальности, но также не могут быть признаны достаточно полными.

3. Наиболее совершенную информационную модель обеспечивают тренажеры на динамической платформе, так как помимо визуальной информации с углом зрения 180° тренажеры этой группы имитируют вестибулярную информацию, возникающую в процессе управления автомобилем. Использование тренажеров на динамической платформе представляется наиболее эффективным. Однако их широкое применение при обучении водителей сдерживается высокой стоимостью тренажеров, необходимостью монтажа в специальном помещении, сложностью обслуживания.

Представленный в статье анализ информационной модели тренажеров может быть полезен для дальнейшего развития науки в исследуемой области. Выявленные достоинства и недостатки современных тренажеров помогут при выборе модели тренажеров, при организации учебного процесса в автошколах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кравченко Л.А., Дубинина Ж.В., Берека И.А. Система обучения водителей в автошколе с учетом личностных качеств // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2019. № 1 (56). С. 42–48.
2. Храмченков А.Г., Пехтерев М.М., Ковалёв А.Ф. Водительские навыки и их формирование // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2007. № 1 (6). С. 68–71.
3. Ильина И.Е., Лянденбургский В.В., Пылайкин С.А., Кротова Е.А. Формирование навыков управления автомобилем на автотренажере // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 5 (24). С. 149.
4. Ильина И.Е., Лянденбургский В.В., Звижинский А.И., Евстратова С.А. Использование автотренажеров в обучении водителей категории «В» // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 1 (40). С. 103–108.
5. Серикова М.Г., Терехов В.М. Совершенствование подготовки специалистов для предприятий автомобильного транспорта // Транспортное дело России. 2014. № 3. С. 68–69.
6. Calvi A., Benedetto A., De Blasiis M.R. A driving simulator study of driver performance on deceleration lanes // Accident Analysis and Prevention. 2012 т. 45. С. 195–203.
7. Roguski Ja., Wantoch-Rekowski R., Koszela Ja., Majka A. Concept of simulator for training fire truck drivers in the national fire-extinguishing system // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. 2012. Т. 28. С. 71–81.
8. Лянденбургская А.В., Морозов И.С., Ильина И.Е., Лянденбургский В.В. Требования к цифровым методам моделирования на тренажере // Уральский научный вестник. 2017. Т. 4. № 3. С. 16–18.
9. Есеновский-Лашков Ю.К. Тренажеры, моделирующие управление автомобилем // Автомобильная промышленность. 2008. № 5. С. 38–40.
10. Трофименко Ю.В., Шашина Е.В. Автобусные тренажеры для подготовки и оценки надежности водителей автобусов // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник/ ВИНТИ РАН. М.: ВИНТИ, 2008. N 8. С.44–47.
11. Родионов Ю.В., Ветохин А.С. Современная концепция обучения и повышения квалификации водителей на автомобильном транспорте // Автотранспортное предприятие. 2008. № 6. С.20–26.
12. Мазур В.В. Современные автомобильные тренажеры // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2007. № 2. С. 145–150.
13. Князева Г.В. Виртуальная реальность и профессиональные технологии визуализации // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2010. № 15. С. 68–76.
14. Ambroš Miha, Prebil Ivan. i3Drive, a 3D interactive driving simulator // IEEE Computer Graphics and Applications.– 2010 т. 30 № 2. С. 86–92.
15. Mourant Ronald R., Ahmad Najla, Jaeger Beverly K., Lin Yingzi . Optic flow and geometric field of view in a driving simulator display // Displays. 2007. С. 145–149.
16. Родионов Ю.В., Ветохин А.С. Динамический автотренажер // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 4. С. 90–93.
17. Яглинский В.П., Гутыря С.С., Обайди А.С., Фелько Н.В., Беликов В.Т. Моделирование акселерационного воздействия на экипажи мобильных машин // Технологічні комплекси. 2014. № 2 (10). С. 100–106.
18. Найниш Л.А., Кувшинова О.А., Роганова Э.В., Мещерякова Е.Н. Некоторые оценки эффективности машинного синтеза изображений местности, влияющие на процесс обучения при использовании тренажеров водителей транспортных средств // Современные информационные технологии. 2017. № 26 (26). С. 129–138.
19. Роганов В.Р. Особенности оптико-аппартно-программных комплексов моделирования 3D-изображения // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров. 2015. С. 83–91.
20. Четвергова М.В., Роганов В.Р., Сёмочкин А.В. Использование оптико-аппартно-программных комплексов для обучения управления подвижными объектами // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 174.
21. Савельев А.М., Степанов А.В. Автомобильный тренажер с системой имитации акселерационных эффектов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2012. № 2 (3). С. 127–130.
22. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер плавающего объекта для обучения экипажей действиям в чрезвычайных

ситуациях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2009. № 1. С. 82–87.

23. Лянденбургская А.В., Морозов И.С., Ильина И.Е., Лянденбургский В.В. Динамические воздействия на тренажере // Приднепровский научный вестник. 2017. Т. 8. № 1. С. 72–75.

24. Яглинский В.П., Обайди А.С., Фелько Н.В. Повышение подвижности кабин динамических тренажеров мобильных машин. Технологический аудит и резервы производства. 2014. Т. 3. № 4 (17). С. 44–48.

25. Колосков Б.Б. Применение шестистепенной динамической платформы в тренажере вождения бронетанковой техники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 11 (3). С. 246–252.

## REFERENCES

1. Kravchenko L.A., Dubinina ZH.V., Bereka I.A. Sistema obucheniya voditelej v avtoshkole s uchetom lichnostnyh kachestv [Driver training system in driving school with personal quality assessment]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2019; 1 (56): 42–48 (in Russian).

2. Hramchenkov A.G., Pekhterev M.M., Kovalyov A.F. Voditel'skie navyki i ih formirovanie [Driving skills and their formation]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skohozyajstvennogo naznacheniya*. 2007; 1 (6): 68–71 (in Russian).

3. Il'ina I.E., Lyandenburskij V.V., Pylajkin S.A., Krotova E.A. Formirovanie navykov upravleniya avtomobilem na avtotrenazhere [Formation of skills of driving on the simulator]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*. 2014; 5 (24): 149 (in Russian).

4. Il'ina I.E., Lyandenburskij V.V., Zvizhinskij A.I., Evstratova S.A. Ispol'zovaniye avtotrenazherov v obuchenii voditelej kategorii "V" [Use of simulator in the training of drivers of the "B" category]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2013; 1 (40):103–108 (in Russian).

5. Serikova M.G., Terekhov V.M. Sovershenstvovaniye podgotovki specialistov dlya predpriyatij avtomobil'nogo transporta [Improvement of training for road transport companies]. *Transportnoye delo Rossii*. 2014; 3: 68–69 (in Russian).

6. Calvi A., Benedetto A., De Blasiis M.R. A driving simulator study of driver performance on

deceleration lanes. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, vol. 45, pp. 195–203.

7. Roguski Ja., Wantoch-Rekowski R., Koszela Ja., Majka A. Concept of simulator for training fire truck drivers in the national fire-extinguishing system. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2012; 28:71–81.

8. Lyandenburskaya A.V., Morozov I.S., Il'ina I.E., Lyandenburskij V.V. Trebovaniya k cifrovym metodam modelirovaniya na trenazhere [Requirements for digital simulation methods on the simulator]. *Ural'skij nauchnyj vestnik*. 2017; 4, no 3: 16–18 (in Russian).

9. Esenovskij-Lashkov Yu.K. Trenazhery, modeliruyushchie upravleniye avtomobilem [Simulators, simulating driving]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2008; 5: 38–40 (in Russian).

10. Trofimenko Yu.V., Shashina E.V. Avtobusnye trenazhery dlya podgotovki i ocenki nadezhnosti voditelej avtobusov [Bus simulators for evaluation of bus drivers' reliability]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye: nauchnyj informacionnyj sbornik/ VINITI RAN*, 2008; 8: 44–47 (in Russian).

11. Rodionov Yu.V., Vetohin A.S. Sovremennaya koncepciya obucheniya i povysheniya kvalifikacii voditelej na avtomobil'nom transporte [Modern concept of training and advanced training of drivers in road transport]. *Avtotransportnoye predpriyatye*. 2008; 6: 20–26 (in Russian).

12. Mazur V.V. Sovremennyye avtomobil'nye trenazhery [Modern car simulators]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Pt. Estestvennyye i inzhenernyye nauki - razvitiyu regionov Sibiri*, 2007; 2: 145–150 (in Russian).

13. Knyazeva G.V. Virtual'naya real'nost' i professional'nye tekhnologii vizualizacii [Virtual reality and professional visualization technologies]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva*. 2010; 15: 68–76 (in Russian).

14. Ambroh Miha, Prebil Ivan. i3Drive, a 3D interactive driving simulator. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2010; 30, no. 2: 86–92.

15. Mourant Ronald R., Ahmad Najla, Jaeger Beverly K., Lin Yingzi. Optic flow and geometric field of view in a driving simulator display. *Displays*. 2007: 145–149.

16. Rodionov Yu.V., Vetohin A.S. Dinamicheskij avtotrenazher [Dynamic simulator]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2011; 4: 90–93 (in Russian).

17. Yaglinskij V.P., Gutyrya S.S., Obajdi A.S., Fel'ko N.V., Belikov V.T. Modelirovaniye aksel-

eracionnogo vozdejstviya na ekipazhi mobil'nyh mashin [Modeling of acceleration exposure crews on mobile machines]. *Tekhnologichni kompleksi*. 2014; 2 (10): 100–106 (in Russian).

18. Nainish L.A., Kuvshinova O.A.I., Roganova E. V., Meshcheryakova E. N. Nekotorye ocenki effektivnosti mashinnogo sinteza izobrazhenij mestnosti, vliyayushchie na process obucheniya pri ispol'zovanii trenazhyorov voditelej transportnyh sredstv [Some estimations of the efficiency of machine-site synthesis of the images affecting the training process when using trainers of vehicle drivers]. *Sovremennye informacionnye tekhnologii*. 2017; 26 (26): 129–138 (in Russian).

19. Roganov V.R. Osobennosti optiko-apparato-programmnyh kompleksov modelirovaniya 3D izobrazheniya [Features of optical-hardware-software complexes of 3D image modeling]. *Teoriya i praktika imitacionnogo modelirovaniya i sozdaniya trenazherov*. 2015: 83–91 (in Russian).

20. Chetvergova M.V., Roganov V.R., Syomochkin A.V. Ispol'zovanie optiko-apparato-programmnyh kompleksov dlya obucheniya upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Using optical-hardware-software complex for management training of moving objects]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; 6: 174 (in Russian).

21. Savel'ev A.M., Stepanov A.V. Avtomobil'nyj trenazher s sistemoy imitacii akseleracionnyh effektivov [Car simulator with acceleration effects simulation system]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2012; 2 (3): 127–130 (in Russian).

22. Proshin I.A., Timakov V.M., Proshkin V.N. Trenazher plavayushchego ob'ekta dlya obucheniya ekipazhej deystviyam v chrezvychajnyh situacijah [Floating simulator for flight crew emergency training]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Iss: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2009; 1: 82–87 (in Russian).

23. Lyandenburskaya A.V., Morozov I.S., Il'ina I.E., Lyandenburskij V.V. Dinamicheskie vozdejstviya na trenazhere [Dynamic effects on the simulator]. *Pridneprovskij nauchnyj vestnik*. 2017; vol. 8, no 1: 72–75 (in Russian).

24. Yaglinskij V.P., Obajdi A.S., Fel'ko N.V. Povyshenie podvizhnosti kabin dinamicheskikh trenazherov mobil'nyh mashin [Increasing the mobility of cabins of dynamic simulators of mobile machines]. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. 2014; 3, no 4 (17): 44–48 (in Russian).

25. Koloskov B.B. Primenenie shestistepennoj dinamicheskoj platformy v trenazhere vozdeniya bronetankovoj tekhniki [Application of the six-test dynamic platform in the simulation of the armored vehicles' driving]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017; 11–3: 246–252 (in Russian).

**Поступила 09.08.2019, принята к публикации 25.10.2019.**

**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**

Белякова Александра Владимировна (г. Омск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ORCID -0000-0001-9430-5128, ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: alek-belyakova@yandex.ru).

Савельев Борис Вадимович (г. Омск, Россия) – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: saveljev@yandex.ru).

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Alexandra V. Belyakova – Senior Lecturer, Cars, Structural Materials and Technologies Department, ORCID 0000-0001-9430-5128, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: alek-belyakova@yandex.ru).

Boris V. Saveliev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Cars, Structural Materials and Technologies Department, Siberian State Automobile and Highway University, (644088, Omsk, 5, Mira Ave, e-mail: saveljev@yandex.ru).

#### **ВКЛАД СОАВТОРОВ**

Белякова А.В. Исследование и анализ материалов. Формирование разделов: «Аннотация», «Введение» (1/2), «Материалы и методы», «Результаты» (1/2), «Обсуждение и заключение» (1/2). Оформление готового варианта статьи.

*Савельев Б.В. Проверка и корректировка статьи. Рекомендации по исследованию материалов. Формирование разделов: «Введение» (1/2), «Результаты» (1/2), «Обсуждение и заключение» (1/2).*

**AUTHORS' CONTRIBUTION**

*Alexandra V. Belyakova – materials' research and analysis; formation of such sections as*

*“Abstract”, “Introduction” (1/2), “Materials and methods”, “Results” (1/2), “Discussion and conclusions” (1/2); formatting of the finished manuscript's version.*

*Boris V. Saveliev – verification and correction of the article; recommendations for the materials' research; formation of such sections as “Introduction” (1/2), “Results” (1/2), “Discussion and conclusions” (1/2).*

## УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТА ТЯГОВОЙ МОЩНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

*\*Е.А. Максимов<sup>1</sup>, Е.П. Устиновский<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>НТПП «Интрай»,*

*г. Челябинск, Россия;*

*<sup>2</sup>Южноуральский государственный университет «ЮуРГУ»,*

*г. Челябинск, Россия,*

*\*maksimov50@mail.ru*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Тяговая мощность автомобиля используется для определения его тягово-скоростных свойств. Целью работы является уточнение расчета тяговой мощности автомобиля.

**Материалы и методы.** Приведена методика уточненного расчета тяговой мощности автомобиля.

**Выводы.** Проведен сравнительный анализ уточненной и традиционной методики расчета тяговой мощности. Получено уточненное уравнение расчета тяговой мощности, учитывающее модуль упругости, ширину дорожки контакта, свободный радиус колеса, прогиб шины, касательные силы трения в плоскости контакта. Наибольшее расхождение между кривой тяговой мощностью автомобиля, рассчитанной по уточненной методике, и кривой тяговой мощностью, рассчитанной по традиционной методике, составляет 26,8%.

**Практическое значение.** Статья может быть полезна специалистам АТП, магистрам вузов для сравнения тягово-скоростных свойств различных типов автомобилей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тяговая мощность автомобиля, модуль упругости, ширина дорожки контакта, свободный радиус колеса, касательные силы трения.

© Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## REFINING THE CALCULATION OF THE CAR TRACTION POWER

\*E.A. Maksimov<sup>1</sup>, E.P. Ustinovsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> "Intrai",

Chelyabinsk, Russia;

<sup>2</sup>South Ural State University,

Chelyabinsk, Russia

\*maksimov50@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Traction power of the car is used to determine its traction-speed properties. The purpose of the paper is the calculation refinement of the car traction power.

**Materials and methods.** The authors used the methodology of the refined calculation of the car traction power.

**Results.** The authors carried out the comparative analysis of the refined and traditional methods for calculating traction power. As a result, the authors obtained the refined equation for calculating the traction power, taking into account the elastic modulus, the width of the contact track, the free radius of the wheel, the deflection of the tire and the tangential friction forces in the contact zone. The largest discrepancy between the curve of the vehicle's traction power calculated by the updated methodology and the curve of the vehicle's traction power calculated by the traditional method was 26.8%.

**Discussion and conclusions.** The results of the research are useful to specialists of automobile and transport enterprises and masters of universities to compare the traction and speed properties of the various car types.

**KEYWORDS:** car traction power, modulus, width of the contact path, tire radius in contact, tire deformations, friction tangential force.

© E.A. Maksimov, E.P. Ustinovsky



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

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что тяговую мощность автомобиля необходимо знать для определения тягово-скоростных свойств<sup>1, 2, 3</sup>. Анализ тягово-скоростных свойств проектируемого автомобиля проводится с целью оценки правильности выбора параметров двигателя и трансмиссии. Для этого используются методы тягового и мощностного балансов. Проектировочный тяговый расчет мощности автомобиля является одним из этапов его проектирования. Целями тягового расчета мощности автомобиля являются предварительный выбор основных характеристик двигателя и трансмиссии, обеспечивающих требуемые тягово-скоростные свойства автомобиля в соответствии с заданием на его проектирование. В ходе выполнения проектировочного расчета решаются следующие задачи: выбор основных весовых и геометрических параметров автомобиля, необходимых для выполнения тягового расчета; определение максимальной мощности двигателя и выбор его внешней скоростной характеристики; расчет передаточных чисел трансмиссии (главной передачи, коробки передач, дополнительных коробок); оценка тягово-скоростных свойств автомобиля<sup>4, 5, 6, 7</sup> [1].

Выбор основных весовых и геометрических параметров автомобиля является первым этапом его проектирования. На данном этапе на основе анализа технических характеристик автомобилей, близких по назначению к проектируемому, производится предварительный выбор весовых, геометрических, компоновочных и других параметров, влияющих на характеристики двигателя и трансмиссии. К этим параметрам относится полная масса автомобиля, общее число мостов и распределение массы по мостам, типоразмер шин [2, 3, 4, 5].

Анализ тягово-скоростных свойств проектируемого автомобиля проводится с целью оценки правильности выбора параметров двигателя и трансмиссии. В настоящее время

широко используется традиционная методика, позволяющая проводить расчет тяговой мощности автомобиля с учетом крутящего момента, мощности, расходуемой на сопротивление качению [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Однако традиционная методика не учитывает параметры шины при ее деформации.

Целью работы является уточнение расчета тяговой мощности автомобиля.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с традиционной методикой<sup>8</sup> уравнение баланса сил автомобиля записывают в виде

$$P_T = P_C + P_K + P_B = P_D + P_{B,H}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – тяговая сила, Н,

$P_C$  – сила сопротивления подъему, Н,

$P_K$  – сила сопротивления качению колес, Н,

$P_B$  – сила сопротивления воздуха, Н,

$P_D = P_C + P_K$  – сила сопротивления дороги, Н.

Тяговую силу определяют по формуле

$$P_T = \frac{M_K}{r_D}, \quad (2)$$

где  $M_K$  – крутящий момент на колесе, Нм,

$r_D$  – динамический радиус колеса, м.

Силу сопротивления качению колес определяют по формуле

$$P_K = P_Z f, \quad (3)$$

где  $P_Z$  – вертикальная внешняя сила, Н,

$f$  – коэффициент сопротивления качению.

Силу сопротивления подъему записывают в виде

<sup>1</sup> Третьяков О.Б., Гудков В.А. Автомобильные шины. М.: Химия, 2007. 432 с.

<sup>2</sup> Тарновский В.Н., Гудков В.А., Третьяков О.Б. Автомобильные шины. М.: Транспорт, 1990. 272 с.

<sup>3</sup> Евзовских В.Е., Райман П.Г. Автомобильные шины, диски и ободья. М.: Автополис плюс, 2010. 203 с.

<sup>4</sup> Савельев Г.В. Автомобильные колеса. М.: Машиностроение, 1983. 151 с.

<sup>5</sup> Вахламов В.К. Автомобили, конструкции и элементы расчета. М.: Академия, 2006. 408 с.

<sup>6</sup> Балабин И.В. Автомобильные и тракторные колеса и шины. М.: Изд-во МГТУ(МАМИ). 2012. 920 с.

<sup>7</sup> Кнороз В.И., Кленников Е.В. Шины и колеса. М.: Машиностроение, 1975. 184 с.

<sup>8</sup> Савельев Г.В. Автомобильные колеса. М.: Машиностроение, 1983. 151 с.

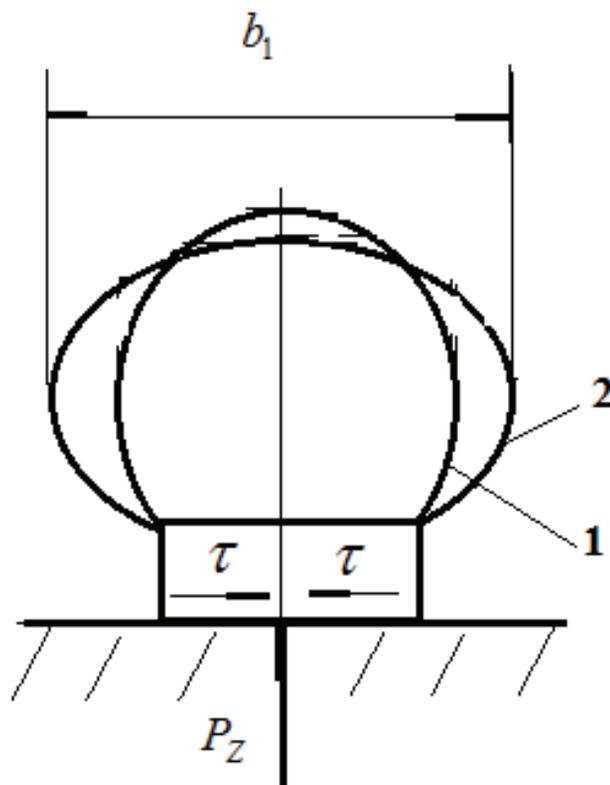


Рисунок 1 – Схема деформации шины: до деформации (1), после деформации (2):  
 $b_1$  – ширина профиля деформированной шины;  $\tau$  – касательные силы трения;  $P_Z$  – вертикальная сила

Figure 1 – Scheme of tire deformation: before deformation (1), after deformation (2):  
 $b_1$  – width of the profile of the deformed tire;  $\tau$  – tangential friction forces;  $P_Z$  – vertical force

$$P_C = P_Z \cos \alpha, \text{ Н}, \quad (4)$$

где  $P_Z$  – вертикальная внешняя сила, Н,  
 $\alpha$  – угол подъема, рад.

Уравнение баланса мощностей автомобиля определяют после умножения составляющих уравнения (1) на  $V^9$

$$N_T = N_D + N_B, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $N_T$  – тяговая мощность, кВт,

$N_D$  – мощность, затрачиваемая колесом на преодоление сопротивления дороги, кВт,

$N_B$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха, кВт.

Мощность, затрачиваемая на преодоление колесом сопротивления дороги, определяется коэффициентом сопротивления качению и другими факторами<sup>10</sup>.

Коэффициент сопротивления качению зависит от многих факторов и определяется экспериментально. Его среднее значение для дороги с различным покрытием и состоянием изменяется от 0,015 до 0,10<sup>11</sup>.

<sup>9</sup> Савельев Г.В. Автомобильные колеса. М.: Машиностроение, 1983. 151 с.

<sup>10</sup> Кнороз В.И., Кленников Е.В. Шины и колеса. М.: Машиностроение, 1975. 184 с.

<sup>11</sup> Там же.

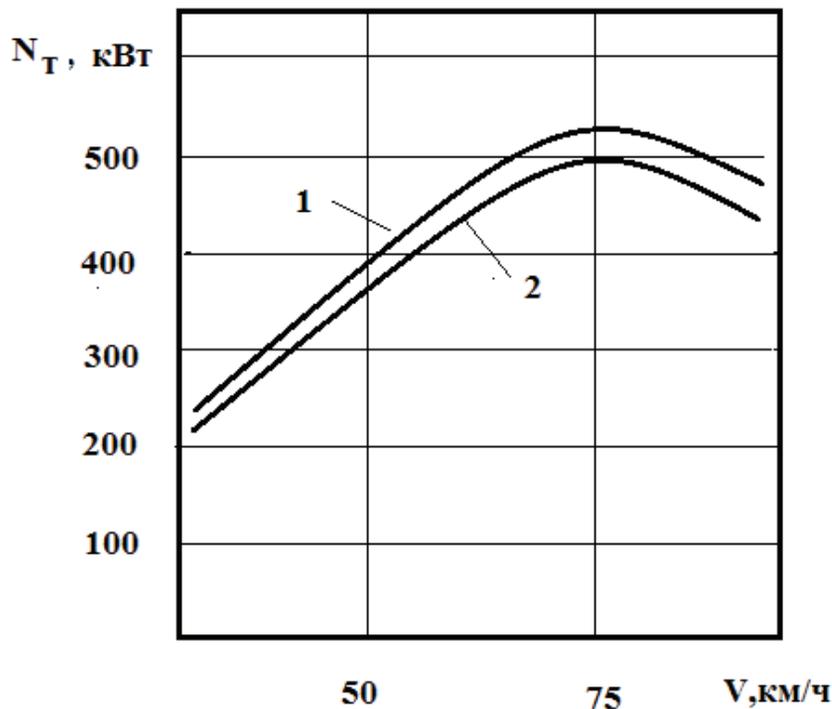


Рисунок 2 – Зависимость тяговой мощности автомобиля от скорости движения:  
1 – расчет по формуле (12); 2 – расчет по формуле (5)

Figure 2 – Dependence of the car traction power on the movement speed:  
1 – calculation by the formula (12); 2 – calculation by the formula (5)

Вместе с тем мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления дороги, определяется площадью контакта, касательными силами трения в плоскости контакта шины с дорожным покрытием и др.

Уточненное уравнение баланса мощностей автомобиля запишем в виде

$$N_T = N_G + N_\tau, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где  $N_T$  – тяговая мощность, кВт,

$N_G$  – мощность, затрачиваемая на деформацию (сжатие) материала шины в контакте, кВт,

$N_\tau$  – мощность, расходуемая на трение между шиной и дорожным покрытием, кВт.

Мощность, затрачиваемую на сжатие шины колеса автомобиля, запишем в виде

$$N_G = P_Z v, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где  $v$  – скорость деформирования, м/с.

При деформации профиля касательные силы трения направлены в сторону, противоположную перемещению шины в поперечном направлении (рисунок 1).

Мощность, расходуемую на трение в контакте, запишем в виде

$$N_\tau = n \iint_F \tau \Delta V dF = 2 \tau_x b l \Delta V, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где  $F = b l$  – площадь контакта, м<sup>2</sup>,

$\tau$  – касательные силы трения в площади контакта шины с дорожным покрытием, МПа,

$b$  – ширина дорожки контакта, м,

$l$  – длина пятна контакта, м.

Разность между линейной скоростью колеса относительно дороги

$$\Delta V = V_K - V_D, \text{ м/с}, \quad (9)$$

где  $V_K$  – линейная скорость колеса, м/с,

$V_D = 0$ .

В поперечном направлении ширина дорожки контакта, как правило, ограничивается двумя параллельными линиями, ширина между которыми может быть определена по формуле [8]:

$$b = k B, \text{ м}, \quad (10)$$

где  $B$  – ширина протектора шины, м,  
 $k = 0,65 \dots 0,75$  – коэффициент.  
Подставляя (10) в (9), получим

$$N_{\tau} = k \tau l B V, \text{ кВт} \quad (11)$$

Подставляя (8), (11) в (6), получим

$$N_T = P_z v + k \tau l B V_K, \text{ кВт}. \quad (12)$$

Сравнивая уравнения для расчета тяговой мощности автомобиля (12) с аналогичным уравнением (5), полученным по традиционной методике, можно отметить, что в данном уравнении не учитываются:

$V_K$  – линейная скорость колеса,  
 $l$  – длина пятна контакта,  
 $b$  – ширина дорожки контакта,  
 $\tau$  – касательные силы трения в площади контакта шины с дорожным покрытием.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость тяговой мощности автомобиля от скорости движения представлена на рисунке 2. Расчет тяговой мощности проведем для следующих параметров:  $M_K = 880$  Нм,  $E = 0,0005$  МПа,  $R_0 = 20$  дюймов = 254 мм,  $H_0 = 20$  мм,  $b = 0,75B$ ,  $B = 8$  дюймов = 203,2 мм.

Анализ кривых, представленных на рисунке 2, показал, что с увеличением скорости движения кривая тяговой мощности автомобиля плавно увеличивается, а затем плавно снижается. Наибольшее расхождение между кривой тяговой мощностью автомобиля, рассчитанной по уточненной методике (12), и кривой тяговой мощностью, рассчитанной по традиционной методике (5), составляет 4–6,8%.

## ВЫВОДЫ

1. Получено уточненное уравнение расчета тяговой мощности автомобиля, учитывающее модуль упругости, ширину дорожки контакта, свободный радиус колеса, прогиб, касательные силы трения в площади контакта шины с дорожным покрытием.

2. Показано, что с увеличением скорости движения кривая тяговой мощности автомо-

биля плавно увеличивается, а затем плавно снижается. Наибольшее расхождение между кривой тяговой мощностью автомобиля, рассчитанной по уточненной методике, и кривой тяговой мощностью, рассчитанной по традиционной методике, составляет 4–6,8%.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балабин И.В., Чабунин И.С., Груздев А.С. Напряженно-деформированное состояние диска колеса с учетом влияния изгибающего момента и осевой силы // Автомобильная промышленность. 2007. №7. С. 13–15.
2. Fosberry R.A. Investigation of stresses in public service vehicle tire wheels // The institution of mechanical engineers, automobile division proceedings (London). pt.3. 2002. pp. 91–100.
3. Ishihara K., Kawashima H., Research of fatigue strength of whills // Tranzasion Japan Society of mechanical engineer. 2009. №513. pp.1254–1258.
4. Богомолов В.А. Расчетное распределение давления в пятне контакта шин с поверхностью дорожной одежды // Вестник ХНАДУ. 2016. вып. 72. С.143–145.
5. Балакина Е.Б. Расчет параметров в пятне контакта // Автомобильная промышленность. 2016. № 3. С.6–7.
6. Козлов Ю.Н., Сальников В.И., Барашков А.А. Определение взаимного положения зон разного трения в пятне контакта шины с опорной поверхностью // Автомобильная промышленность. 2016. № 3. С. 6–7.
7. Konishi H., Fujiwara A., Katsura, Nakata M. Estimation of impact strength of aluminium wheels // Kobe Steel report. 2007. №2. С. 25–28.
8. Morita Y., Ishihara K. Stress analysis in automobile wheels by mains МКСН // Sumimoto Metals. 2007. №3. pp. 245–263.
9. Svendenias Jakob. The modeling and friction estimation // Departament of automatic control Lund University, Lund, Sweden. 2007. 233 p.
10. Paul Haney. Tire.The racing and high-performance // Strigfild. USE. 2003. 432 p.
11. Hans B. Pacejka Tire and vehiche dynamics // Published by Elsevier Ltd. USA. 2–12. 322 p.
12. Wong J.U. Theory of ground vehickls // Canada.wiby. John and Sons Inc. 2001. 267 p.
13. Балабин И.В. Расчет напряженного состояния неразъемного обода колеса грузовых автомобилей и автобусов // Автомобильная промышленность. 2011. №12. С. 20–22.
14. Богданова Т.А., Довженко Н.А., Гильманшина Т.Р. Современные технологии изготовления дисков автомобильных колес // Со-

временные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 226–228.

15. Григолюк Э.И., Фролов А.И., Балабин И.В. и [др.] О напряженном состоянии дисковых колес грузовых автомобилей при неосесимметричном нагружении // Автомобильная промышленность. 1982. №9. С. 21–23.

16. Демьянушко И.В. Информационные технологии и создание автомобильных конструкций // Автомобильная промышленность. 2003. №9.

17. Балабин И.В. Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния дисков колес // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. №3. С.15–19.

### REFERENCES

1. Balabin I.V., Chabunin I.S., Gruzdev A.S. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanija diska kolesa s uchetom vlijanija izgibajushhego momenta i osevoj sily [Stress-strain state of the wheel disk, taking into account the influence of bending moment and axial force]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2007; 7: 13–15 (in Russian).

2. Fosberry R.A. Investigation of stresses in public service vehicle tire wheels // *The institution of mechanical engineers, automobile division proceedings (London)*. 2002; pt.3: 91–100.

3. Ishihara K., Kawasshima H., Research of fatigue strength of whills // *Tranzasion Japan Society of mechanical engineer*. 2009; 513: 1254–1258.

4. Bogomolov V.A. Raschetnoe raspredelenie davlenija v pjatne kontakta shin s poverhnost'ju dorozhnoj odezhdy [Settlement distribution of pressure in the tire contact with a pavement surface]. *Vestnik HNADU*. 2016; 72:143–145 (in Russian).

5. Balakina E.B. Raschet parametrov v pjatne kontakta [Calculation of parametres in a contact stain]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2016; 3: 6–7 (in Russian).

6. Kozlov Ju.N., Sal'nikov V.I., Barashkov A.A. Opredelenie vzaimnogo polozhenija zon raznogo trenija v pjatne kontakta shiny s opornoj poverhnost'ju [Determination of the mutual position of the zones of different friction in the contact patch of the tire with the supporting surface]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2016; 3: 6–7 (in Russian).

7. Konishi H., Fujiwara A., Katsura ,Nakata M. Estimation of impact strength of aluminium wheels // *Kobe Steel report*. 2007; 2: 25–28.

8. Morita Y., Ishihara K. Stress analysis in automobile wheels by mains МКСН // *Sumimoto Metals*. 2007; 3: 245–263.

9. Svendenias Jakob. The modeling and friction estimation // *Departament of automatic control Lund University, Lund, Sweden*. 2007. 233 p.

10. Paul Haney. Tire. The racing and high-performance // *Strigfild*. USE. 2003. 432 p.

11. Hans B. Pacejka Tire and vehiche dynamics // *Published by Elsevier Ltd*. USA. 2–12. 322 p.

12. Wong J.U. Theory of ground vehickls // *Canada.wiby. John and Sons Inc*. 2001. 267 p.

13. Balabin I.V. Raschet naprjazhennogo sostojanija neraz"emnogo oboda kolesa gruzovyh avtomobilej i avtobusov [Calculation of the stress state of the integral wheel rim of trucks and buses]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2011; 12: 20–22 (in Russian).

14. Bogdanova T.A., Dovzhenko N.A., Gil'man-shina T.R. Sovremennye tehnologii izgotovlenija diskov avtomobil'nyh koles [Modern technologies of the car wheels' manufacture]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2014; 5: 226–228 (in Russian).

15. Grigoljuk Je.I., Frolov A.I., Balabin I.V., i dr. O naprjazhennom sostojanii diskovyh koles gruzovyh avtomobilej pri neosesimmetrichnom nagruzenii [On the stress state of truck disk wheels under non-axisymmetric loading]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 1982; 9: 21–23 (in Russian).

16. Dem'janushko I.V. Informacionnye tehnologii i sozdanie avtomobil'nyh konstrukcij [Information technologies and creation of automobile constructions]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2003; 9 (in Russian).

17. Balabin I.V. Analiticheskoe opredelenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija diskov koles [Analytical determination of the stress-strain state of wheel disks]. *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny*. 2002; 3:15–19 (in Russian).

**Поступила 19.06.2018, принята к публикации 25.10.2019.**

**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

Максимов Евгений Александрович – канд. техн. наук НТПП «Интрай» (454091, г. Челябинск, 3 Интернационала, 113а, e-mail: Maksimov50@mail.ru).

Устиновский Евгений Петрович – канд. техн. наук, проф. кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76).

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Evgeny A. Maksimov – Candidate of Technical Sciences, “Intray” (454091, Chelyabinsk, 113a, 3<sup>rd</sup> Internatsionala St., e-mail: Maksimov50@mail.ru).*

*Evgeny P. Ustinovsky – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Technical Mechanics, South Ural State University (764080, Chelyabinsk, 76, Lenin Ave.).*

**ВКЛАД СОАВТОРОВ**

*Максимов Е.А. Уточненное уравнение расчета тяговой мощности автомобиля,*

*учитывающее модуль упругости, ширину дорожки контакта, радиус шины на входе в контакт, абсолютную деформацию шины колеса, касательные силы трения в контакте.*

*Устиновский Е.П. Расчет и построение графиков тяговой мощности автомобиля.*

**AUTHORS' CONTRIBUTION**

*Evgeny A. Maksimov – specifying the equation of calculation of the car traction power; considering the modulus, width of the contact path, tire radius, absolute deformations of the tire, the friction tangential force in the contact zone.*

*Evgeny P. Ustinovsky – calculation and construction of schedules of the car traction power.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОЛНОУПРАВЛЯЕМОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

*\*А.А. Маркина, С.Н. Чепкасов, М.А. Бережная*  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
*\*aa.akulova@urfu.ru*

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Со второй половины XX века вопрос безопасности в автомобильной промышленности выходит на первое место, поэтому особое внимание уделяется устойчивости и управляемости. Повышение показателей данных свойств может достигаться различными путями, одним из которых является конструкция с четырьмя управляемыми колёсами (4WS). Технические решения таких схем более исследованы в зарубежной литературе на примере спортивных автомобилей и некоторых японских моделей, работы отечественных исследователей носят в основном описательный характер существующих решений.

**Материалы и методы.** В статье приведён анализ кинематики легкового полноуправляемого автомобиля. Рассмотрена геометрия поворота с положительными и отрицательными углами подруливания, на основании чего предложены расчетные формулы для определения радиуса поворота автомобиля, углов поворота колес. Данные кинематические соотношения могут быть использованы при проектировании системы рулевого управления с четырьмя управляемыми колесами.

**Результаты.** На примере автомобиля Volkswagen Polo произведён расчёт радиуса поворота и траекторной управляемости в зависимости от углов поворота колес передней и задней оси, показано изменение данных параметров и их влияние на безопасность и управляемость транспортного средства. Показаны преимущества применения полноуправляемой схемы для легкового автомобиля.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полноуправляемый автомобиль, автомобиль с четырьмя управляемыми колесами, кинематика поворота автомобиля, маневренность автомобиля, управляемость автомобиля, траекторная управляемость, курсовая устойчивость автомобиля, подруливающая задняя ось, радиус поворота автомобиля, схема поворота автомобиля.

© А.А. Маркина, С.Н. Чепкасов, М.А. Бережная



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# KINEMATIC STUDY OF THE FOUR-WHEELED STEERING SYSTEM

*\*A.A. Markina, S.N. Chepkasov, M.A. Berezhnaya  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B.N. Yeltsin  
Yekaterinburg, Russia*

## ABSTRACT

**Introduction.** Since the second half of the 20th century the safety in the automotive industry has been bringing to the forefront. Therefore, researches pay special attention to stability and controllability. These properties increase in a variety of ways, one of which is using of the four-wheel steering system (4WS). Foreign literature presents technical solutions on the example of sport cars and some Japanese models.

**Materials and methods.** The paper provided an analysis of the four-wheeled steering passenger car's kinematics. The authors considered the turning geometry with positive and negative steering angles of rear axle, on the basis of which the researches proposed calculation formulas for determining the turning radius of the car and the angles of the wheels' rotation. The kinematic relations used in designing a steering system with four steered wheels.

**Results.** The authors on the example of Volkswagen Polo calculated the turning radius and controllability depending on the steering wheels' angles of the front and rear axles. As a result, the paper demonstrated the change in parameters and the effect on the safety and handling of the vehicle. The authors also highlighted the advantages of using a four-wheeled steering system.

**KEYWORDS:** fully-controlled car, four-wheeled steering system, turning kinematics of the vehicle, car maneuverability, car controllability, intelligence steering control system, steering axle, car turning radius, handling stability, kinematic analysis.

© A.A. Markina, S.N. Chepkasov, M.A. Berezhnaya



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

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросам изучения управляемости и криволинейного движения транспортных средств уделяется большое внимание в современных исследованиях. Поскольку уровень развития технологий позволяет автоматизировать управление параметрами рулевого управления и создавать интеллектуальные системы, особое внимание уделяется вопросам анализа кинематических соотношений, описывающих криволинейное движение, математических моделей и алгоритмов, построенных на их основе [1, 2, 3, 4]. Использование математических и имитационных моделей [5, 6] позволяет добиться оптимальных настроек рулевого управления, тормозной системы и подвески с точки зрения безопасности движения, в том числе при совершении маневров, близких к границе потери устойчивости.

На сегодняшний день маневренность и устойчивость автомобиля на дороге является важным критерием безопасности в связи с увеличением скоростей движения, одним из способов улучшения показателей данных свойств будет использование автомобилей с более чем одной управляемой осью. Первоначально подобные технические решения применялись на военных колесных машинах высокой проходимости и на сочлененных транспортных средствах большой грузоподъемности [7]. В 30-х годах схему с управляемыми передней и задней осью было предложено использовать в гражданском автомобилестроении, чтобы решить проблему парковки в ограниченном пространстве, перестроение из одной полосы в другую в высокоскоростном режиме, исключить виляние и занос осей на высоких скоростях. Применялись различные схемы приводов управления задней осью: механический, гидравлический и электрический, однако широкого распространения не получили, поскольку надежность данных систем пока ещё остаётся невысокой [8, 9].

В полноуправляемом автомобиле задние колеса поворачиваются вместе с передними колесами, угол поворота зависит от передаточного числа редуктора установленного между передней и задней осями. Одним из важных преимуществ использования схемы с четырьмя управляемыми колёсами является возможность изменения направления поворота задних колёс относительно передних. При низкой скорости движения задние колеса поворачиваются в противоположном направлении от передних, что позволяет уменьшить радиус поворота, такая схема называется от-

рицательной. Данный режим актуален при маневрировании в ограниченном пространстве, при парковке. На высокой скорости передние и задние колеса поворачиваются в одном направлении – положительная схема, что необходимо при маневрировании из одной полосы в другую на высоких скоростях [10].

Более подробно вопросы управляемости и маневренности автомобилей с двумя управляемыми осями рассмотрены в зарубежной литературе, в том числе вопросы моделирования и определения показателей управляемости, маневренности и устойчивости. В [11] описаны результаты исследования маневренности автомобиля с двумя управляемыми осями на примере анализа геометрии маневра «перестановка» и «парковка», показаны существующие схемы реализации подруливающей задней оси. Подробный анализ алгоритма работы подруливающей оси и перемены фаз поворота задних колес рассмотрен в [12], сделаны выводы об оптимальных параметрах системы с точки зрения показателей управляемости. В [13, 14, 15, 16] приведены математические модели криволинейного движения автомобиля с четырьмя управляемыми колесами. Сравнительный анализ показателей маневренности, полученных при помощи имитационного моделирования и реальных испытаний на примере автомобиля класса «Формула Студент», приведен в [17, 18], где показано, что помимо изменений геометрических показателей маневренности, использование четырехколесного управления позволяет увеличить среднюю скорость прохождения трассы, что является важным критерием для спортивного автомобиля.

Для расчета рулевого механизма и рулевого привода необходимо иметь представление о кинематических связях между управляемыми колёсами, вопрос расчета показателей маневренности автомобиля с четырьмя управляемыми колесами на сегодняшний день не рассмотрен до конца. Большая часть исследований носит исключительно описательный характер или показывает результаты испытаний, однако не хватает изысканий для проведения проектного расчета рулевого управления с двумя управляемыми осями. Поэтому в данной статье будет рассмотрена кинематика поворота положительной и отрицательной схем полноуправляемых автомобилей, приведены схемы и выведены основные расчетные соотношения. В свою очередь определение основных параметров маневренности и управляемости позволит оценить изменение данных свойств в сравнении с автомобилем с обычным рулевым управлением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения радиуса поворота и углов поворота управляемых колес необходимо рассмотреть схему поворота автомобиля с че-

тырьмя управляемыми колесами (рисунок 1). Приведенная схема и выведенные на ее основе кинематические зависимости выполнены на основе известных и признанных работ [19, 20, 21] в области управляемости и устойчивости

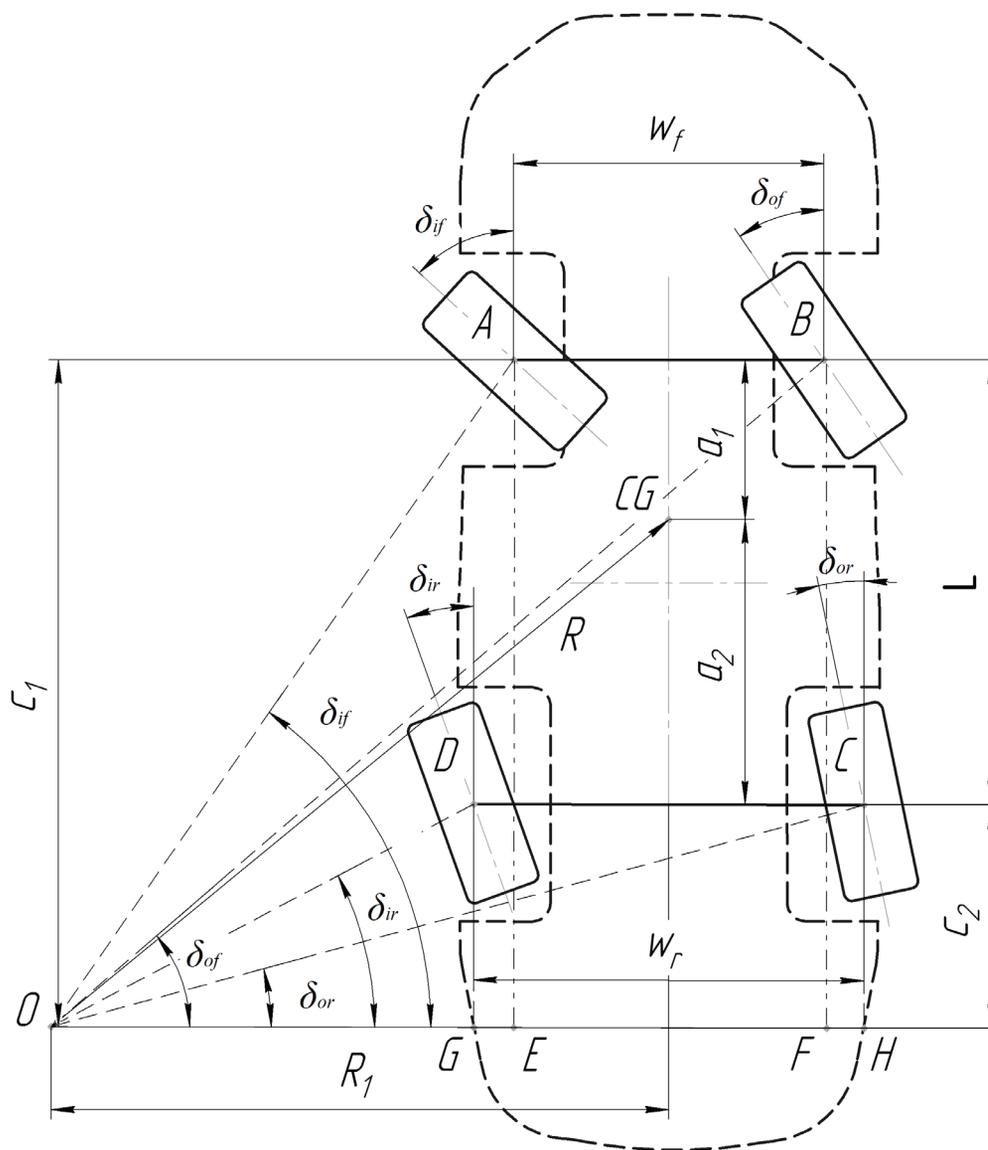


Рисунок 1 – Положительная схема поворота полноуправляемого автомобиля:  
 $L$  – колесная база,  $W_f$  – колея передних колес,  $W_r$  – колея задних колес,  $CG$  – центр масс,  
 $a_1$  – расстояние от передней оси до центра масс,  $a_2$  – расстояние от задней оси до центра масс,  
 $O$  – центр поворота,  $c_1$  – расстояние от передней оси до центра поворота,  $c_2$  – расстояние от задней оси  
до центра поворота,  $\delta_{if}$  – угол поворота переднего внутреннего колеса,  
 $\delta_{of}$  – угол поворота переднего внешнего колеса,  $\delta_{ir}$  – угол поворота заднего внутреннего колеса,  
 $\delta_{or}$  – угол поворота заднего наружного колеса,  $R_1$  – радиус поворота,  $R$  – кривизна траектории

Figure 1 - Positive turning scheme of the four-wheeled steering car:  $L$  – wheelbase,  $W_f$  – front wheel track,  
 $W_r$  – rear wheel track,  $CG$  – gravity center,  $a_1$  – distance from the front axle to the center of gravity,  
 $a_2$  – distance from the rear axle to the center of gravity,  $O$  – center of turning,  $c_1$  – distance from the front axle  
to the turning center,  $c_2$  – distance from the rear axle to the turning center,  $\delta_{if}$  – angle of the front inner wheel turning,  
 $\delta_{of}$  – angle of the front outer wheel turning,  $\delta_{ir}$  – angle of the rear inner wheel turning,  
 $\delta_{or}$  – angle of the rear outward on wheel turning,  $R_1$  – turning radius,  $R$  – trajectory curvature

колесных машин. На данном этапе исследования было принято решение, что увода колес при движении не происходит, поскольку учет переменных углов увода достаточно сильно усложняет задачу и требует динамического моделирования, данный вопрос видится как перспектива для дальнейшего исследования.

Для положительной схемы поворота характерно одинаковое направление поворота колес передней и задней оси. Проведя перпендикуляры к векторам скоростей каждого из колес, найдем центр поворота т. О, из этой точки опустим перпендикуляр на продольную плоскость автомобиля. Это расстояние принято считать радиусом поворота автомобиля  $R_1$ , затем спроецируем точки центра пятна контакта каждого из колес на опущенный из точки О перпендикуляр, получим точки G, E, F, H.

Рассмотрев треугольники  $OEA$ ,  $OFB$ ,  $OGD$  и  $OHC$ , получим, что углы поворота колес, колея и колесная база связаны следующим соотношением:

$$\frac{W_f}{\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if}} - \frac{W_r}{\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir}} = L. \quad (1)$$

Тогда условие осуществления поворота для автомобиля с четырьмя управляемыми колесами может быть записано как

$$\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if} = \frac{W_f}{L} - \frac{W_r}{L} \cdot \frac{\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if}}{\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir}}. \quad (2)$$

Углы поворота передних и задних колес связаны через передаточное число механизма задней оси  $u_{fr}$ , как правило, задние колеса поворачиваются на меньший угол, чем передние. Обзор существующих конструкций полноуправляемых автомобилей [7, 8, 9, 11] показал, что передаточное отношение между передней и задней осью находится в пределах 2,25...4. На первом этапе зададим передаточное отношение между осями и определим угол поворота задней оси  $\delta_r$  в зависимости от угла поворота передней оси  $\delta_f$ .

$$\delta_r = \frac{\delta_f}{u_{fr}}. \quad (3)$$

Угол поворота передней и задней оси находится как среднеарифметическое между углами поворота колес соответствующей оси и определяется для точки пересечения с продольной осью автомобиля, тогда можно записать следующее соотношение:

$$\cot \delta_f = \frac{R_1}{L + c_2}, \quad (4)$$

$$\cot \delta_r = \frac{R_1}{c_2}. \quad (5)$$

Откуда найдем зависимость положения центра поворота от углов поворота осей, используя следующие формулы:

$$c_2 = \frac{L * \cot \delta_f}{\cot \delta_r - \cot \delta_f}, \quad (6)$$

$$R_1 = c_2 * \cot \delta_r, \quad (7)$$

$$c_1 = L + c_2. \quad (8)$$

Далее определим углы поворота внутренних и внешних колес передней и задней оси автомобиля:

$$\tan \delta_{if} = \frac{c_1}{R_1 - W_f/2}, \quad (9)$$

$$\tan \delta_{of} = \frac{c_1}{R_1 + W_f/2}, \quad (10)$$

$$\tan \delta_{ir} = \frac{c_2}{R_1 - W_r/2}, \quad (11)$$

$$\tan \delta_{or} = \frac{c_2}{R_1 + W_r/2}. \quad (12)$$

Используя полученные значения, определим показатели кинематики поворота и маневренности: радиус кривизны –  $R$ , габаритную полосу поворота –  $\Delta R$ , максимальный и минимальный радиусы поворота –  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$ :

$$R = \sqrt{(a_2 + c_2)^2 + c_1^2 \cot^2(\delta_f)}, \quad (13)$$

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min}, \quad (14)$$

$$R_{\max} = \sqrt{(R_{\min} + W_r)^2 + (c_1 + g)^2}, \quad (15)$$

$$R_{\min} = R_1 - \frac{W_r}{2} - r_w \sin \delta_{ir}, \quad (16)$$

где  $g$  – расстояние от передней оси до наиболее удаленной точки кузова автомобиля при повороте;

$r_w$  – свободный радиус колеса.

Из полученных соотношений видно, что при однонаправленном повороте передних и

задних колес происходит увеличение радиуса поворота и габаритных показателей маневренности, что актуально при высоких скоростях движения и позволяет избежать потери курсовой устойчивости.

Для отрицательной схемы поворота четырехколесного рулевого управления основные зависимости также могут быть получены из анализа геометрии кинематики поворота (рисунок 2).

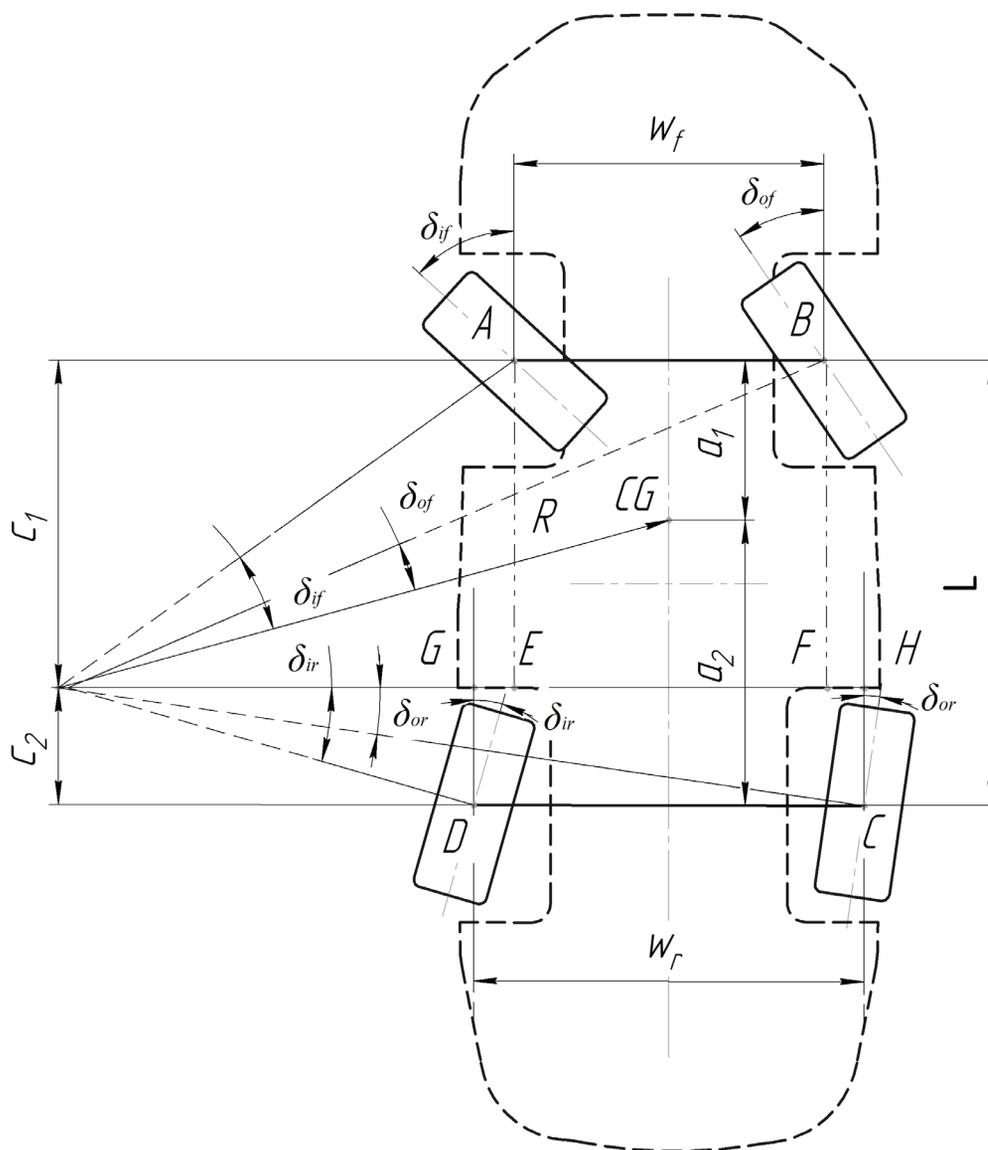


Рисунок 2 – Отрицательная схема поворота полноуправляемого автомобиля

Figure 2 – Negative turning scheme of the four-wheeled steering car

Для данной схемы поворота характерно противоположное направление поворота колес передней и задней оси. Проведя аналогичные построения, что и для положительной схемы, и рассмотрев треугольники  $OEA$ ,  $OFB$ ,  $OGD$  и  $OHC$ , получим, что углы поворота колес, колея и колесная база связаны следующим соотношением:

$$\frac{W_f}{\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if}} + \frac{W_r}{\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir}} = L. \quad (17)$$

Углы поворота передней и задней оси определяются из соотношений:

$$\cot \delta_f = \frac{R_1}{L - c_2}, \quad (18)$$

$$\cot \delta_r = \frac{R_1}{c_2}. \quad (19)$$

Аналогично найдем зависимость положения центра поворота от углов поворота осей, используя следующие формулы:

$$c_2 = \frac{L * \cot \delta_f}{\cot \delta_r + \cot \delta_f}, \quad (20)$$

$$R_1 = c_2 * \cot \delta_r, \quad (21)$$

$$c_1 = L - c_2. \quad (22)$$

Узнав значения углов поворота каждого из колес и применяя выражения (9, 10, 11, 12), определим показатели маневренности для отрицательной схемы поворота полноуправляемого автомобиля, используя следующие зависимости:

$$R = \sqrt{(a_2 - c_2)^2 + c_1^2 \cot^2(\delta_f)}, \quad (23)$$

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min}, \quad (24)$$

$$R_{\max} = \sqrt{(R_{\min} + W_r)^2 + (c_1 + g)^2}, \quad (25)$$

$$R_{\min} = R_1 - \frac{W_r}{2} - r_w \sin \delta_{ir}. \quad (26)$$

Из полученных соотношений видно, что при отрицательной схеме поворота полноуправляемого автомобиля, геометрические показатели маневренности уменьшаются, следовательно увеличивается его способность двигаться в ограниченном пространстве. В современных конструкциях, как оговаривалось ранее, направление доворота задних колес изменяется в зависимости от скорости движения и угла поворота рулевого колеса, используя преимущества обеих схем для конкретных условий движения.

Далее, применяя полученные расчетные зависимости, определим изменение параметров маневренности для автомобиля Volkswagen Polo и сравним со значениями данных показателей для базовой версии автомобиля. Данный автомобиль был выбран как один из наиболее востребованных городских автомобилей на азиатском рынке за последние три года.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительно для проведения расчетов были получены геометрические параметры автомобиля Volkswagen Polo, которые в дальнейшем использованы как исходные данные. Далее, задаваясь углом поворота рулевого колеса и передаточными отношениями в механизмах и приводах, был рассчитан угол поворота передней и задней оси. Стоит отметить, что на сегодняшний день, система 4WS не устанавливается на данный автомобиль, а расчеты необходимы для оценки изменения свойств управляемости и маневренности автомобиля с перспективой проектирования всеколесного рулевого управления.

По методике, описанной выше, были рассчитаны следующие параметры: радиус поворота  $R_1$ , кривизна траектории  $R$ , максимальный радиус поворота  $R_{\max}$ , минимальный радиус поворота  $R_{\min}$ , ширина габаритной полосы поворота  $\Delta R$ , значение коэффициента траекторной управляемости  $K$ .

На рисунке 3 приведены графики зависимости изменения радиуса поворота от угла поворота рулевого колеса и углов поворота передней и задней оси.

Как видно из представленных графиков, при небольшом угле поворота рулевого колеса за счет поворота задних колес сонаправлено с передними происходит увеличение радиуса поворота, что способствует увеличению

критической скорости по курсовой и траекторной устойчивости. При более значительном угле поворота рулевого колеса и невысоких скоростях изменяется направление поворота задних колес, в результате чего уменьшается радиус и габаритная ширина поворота. Так, согласно полученным расчетным значениям, габаритная ширина поворота уменьшается в среднем на 19 см для крайнего положения рулевого колеса, а максимальный габаритный радиус на 35%.

Одной из актуальных на сегодняшний день задач является разработка интеллектуального алгоритма доворота задней оси [22, 23], позволяющего определять дорожную ситуацию, необходимый угол и направление поворота. Написание управляющей программы и алгоритма для такой системы требует разработки

динамической модели поворота автомобиля с четырьмя управляемыми колесами, а также проведения натурных испытаний модернизированного автомобиля для верификации полученной модели, что видится перспективой дальнейшего исследования.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что использование системы 4WS позволяет улучшить такие эксплуатационные свойства автомобиля, как устойчивость, управляемость и маневренность, это подтверждается теоретическими расчетами и натурными испытаниями, описанными в зарубежных журналах. Приведенная в статье методика позволяет произвести расчет основных геометрических параметров автомобиля с системой 4WS, необходимых для кон-

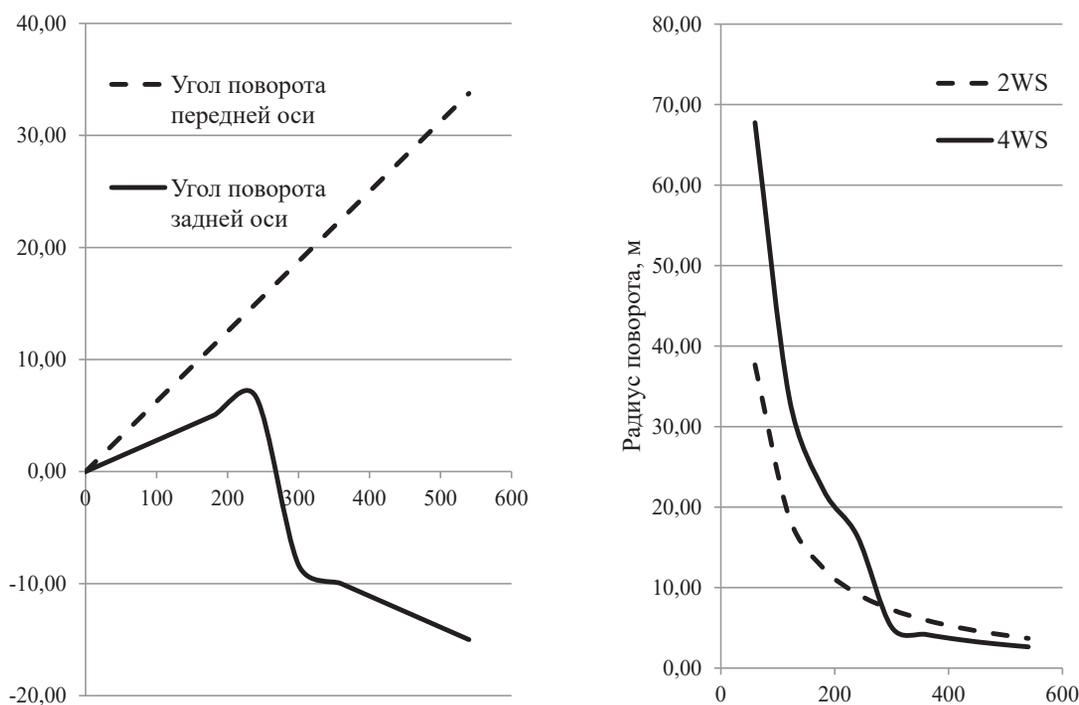


Рисунок 3 – Результаты расчетов для автомобиля VW Polo: а – изменение радиуса поворота от угла поворота рулевого колеса для 2WS и 4WS систем; б – зависимость изменения угла поворота передней и задней оси от угла поворота рулевого колеса для 4WS

Figure 3 - Calculation results for VW Polo: a – change of turning radius from steering angle for 2WS and 4WS systems; b – dependence of the turning angle of the front and rear axles on the turning angle of the 4WS steering wheel

струирования системы рулевого управления. Получены графики изменения радиуса поворота автомобиля в зависимости от угла поворота рулевого колеса для обычного и полноуправляемого автомобиля, подтверждающие улучшение приведенных выше свойств.

Можно сделать вывод, что внедрение 4WS системы является актуальной темой на сегодняшний день и нуждается в качественной проработке, поскольку значительное количество вопросов остается нерешенным. Основной задачей, которая на сегодняшний день стоит перед исследователями, является повышение надежности данной системы, что позволило бы применять ее серийно. Также среди перспективных вопросов остается разработка математической и имитационной модели движения автомобиля, оснащенного данной системой, для создания управляющей программы, подстраивающейся под стиль вождения, внешние и дорожные условия.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B. Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle / Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B., Solarov O., Sirenko Yu. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2017. Т.3. № 7 (87). С. 59–65. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101335.
2. Котиев Г.О., Чернышев Н.В., Горелов В.А. Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колёсной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом // Журнал Автомобильных Инженеров. 2009. №2 (55). С. 34–39. ISSN: 2073-9133.
3. Горелов В.А., Косицын Б.Б. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №7 [676]. С. 45–54. DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-45-55.
4. Тарасик В.П. Методика имитационного моделирования режима испытаний на управляемость и устойчивость автомобиля при входе в поворот // Вестник Белорусско-Российского университета. 2019. № 2 (63). С. 44–53. ISSN: 2077-8481.
5. Тумасов А.В., Вашурин А.С., Торопов Е.И. [и др.] Оценка устойчивости автомобилей, оснащенных электронными системами помощи водителю, по результатам виртуально-физических испытаний // Актуальные вопросы машиноведения. 2018. №7. С. 27–31. ISSN 2306-3084.
6. Пожидаев С.П. Исследование управляемости колесных машин с помощью частотных методов анализа // В сборнике: Организация и безопасность дорожного движения: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения д-ра техн., наук, проф. Л.Г. Резника: в 2 томах. 2017. С. 98–105.
7. Морозов С.А. К вопросу о повышении устойчивости легковых автомобилей малого класса с всеколесным рулевым управлением // Журнал Автомобильных Инженеров. 2009. №4 (57). С. 26–29.
8. Олещицкий С.В., Дремов А.Б. Полноуправляемые автомобили // В сборнике: Будущее науки – 2018. Сборник научных статей 6-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2018. С. 217–220.
9. Sundar S., Sudarsanan T., Krishnan R.. Review of Design and Fabrication of four wheel Steering system // International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER). 2018. Volume 04. Issue 10. pp. 1034–1049.
10. Серикова И.А. Динамическая устойчивость автомобилей с всеколесным рулевым управлением // Автомобиль и Электроника. Современные Технологии. 2012. № 1 (3). С. 24–29.
11. Pilisiewicz J., Kaczyński R. Geometric analysis of maneuverability performance for vehicles with two steering axles // Transport Problems. 2017. V. 12. Issue 2. pp 43–52. DOI: 10.20858/tp.2017.12.2.5.
12. Singh A., Kumar A., Chaudhary R., Singh R. Study of 4 Wheel Steering Systems to Reduce Turning Radius and Increase Stability // International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014). 2014. pp. 96–102. ISBN 978-93-5156-328-0.
13. Ai, Y., Zhou, Q., & Zhang, H. A New Simulation Model for 4WS Vehicles based on Dynamic Tire Friction Model. // 2nd IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications. 2006. pp. 1–6.
14. Zharif M., Ogino H., Ishak M. Research on Steering Control of a 4 Wheel Steering Electric Vehicle with Intelligence Steering Control System // Proceedings of the School of Engineering Tokai University. 2015. Ser. E 40. pp. 71–75.

15. Sethupathi A., Chandradass B., Praketh J., Asuthkar G., Kumar M. Design and fabrication of four wheel steering system for light motor vehicles. / Sethupathi A., Chandradass B., Praketh J., Asuthkar G., Kumar M. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. pp. 1202–1217. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012185.

16. X. Tu, J. Lie. Robust navigation control of a 4WD/4WS agricultural robotic vehicle // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. pp. 164–175. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104892.

17. Amdouni I., Jeddi N., Amraoui L.. Optimal control approach developed to Four-Wheel Active Steering Vehicle // IEEE. 2016. pp. 1–6, DOI: 10.1109/ICMSAO.2016.6552547.

18. Allwright J. Four Wheel Steering (4WS) on a Formula Student Racing Car // VTE-J. Vol. 1. №1. 2015. pp. 3–12.

19. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.

20. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. – М.: Машиностроение, 1973. – 216с.

21. Горелов В.А., Наумов В.Н. Всеколёсное управление: поворот к маневренности // Мир транспорта. – 2008. – No2. – С. 28 – 35.

22. Tan Y., Guo Sh., Hong Y. Sliding-mode control of four wheel steering systems // ICMA. 2017. pp. 1250–1255. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015996.

23. Tirumala A., Anurag J. Analysis of a four-wheeled steering mechanism for automobiles. // AIP Conference Proceedings. 2019. pp. 2148–2161. DOI: 10.1063/1.5123976.

## REFERENCES

1. Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B., Solarov O., Sirenko Yu. Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal perezodovyykh tekhnologii*. 2017; V.3. № 7 (87): 59–65. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101335.

2. Kotiev G.O., Chernyshev N.V., Gorelov V.A. Matematicheskaya model' krivolinejnogo dvizheniya avtomobilja s koljosnoj formuloj 8x8 pri razlichnyh sposobah upravlenija povorotom [Mathematical model of curved movement of a car with the 8x8 wheel formula under various methods of the turning control]. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov*. 2009; 2 (55): 34–39. ISSN: 2073-9133.

3. Gorelov V.A., Kosicyn B.B. Razrabotka kompleksnoj sistemy upravlenija dvizheniem sportivnogo avtomobilja klassa "Formula Student" po zadannoj trasse [Development of complex system of the sport car's movement control of the "Formula Student" class along the specified route]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2016; 7 [676]: 45–54. DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-45-55.

4. Tarasik V.P. Metodika imitacionnogo modelirovanija rezhima ispytanij na upravljaemost' i ustojchivost' avtomobilja pri vhode v povorot [Simulation method of the mode of tests for controllability and stability of the car at the turning]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2019; 2 (63): 44–53. ISSN: 2077-8481.

5. Tumasov A.V., Vashurin A.S., Toropov E.I. i dr. Ocenka ustojchivosti avtomobilej, osnashhenykh jelektronnymi sistemami pomoshhi voditelju, po rezul'tatam virtual'no-fizicheskikh ispytanij [Evaluation of the vehicles' stability equipped with electronic driver assistance systems based on results of virtual-physical tests]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija*. 2018; 7: 27–31. ISSN 2306-3084.

6. Pozhidaev S.P. Issledovanie upravljaemosti kolesnyh mashin s pomoshh'ju chastotnyh metodov analiza [Research of the wheeled vehicles controllability by the frequency analysis methods]. *V sbornike: Organizacija i bezopasnost' dorozhnogo dvizhenija Materialy X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 85-letiju so dnja rozhdenija d. t. n., professora L.G. Reznika: v 2 tomah*. 2017: 98–105.

7. Morozov S.A. K voprosu o povyshenii ustojchivosti legkovykh avtomobilej malogo klassa s vsekolesnym rulevym upravleniem [To the issue of increasing the stability of small-class passenger cars with all-wheel steering]. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov*. 2009; 4 (57): 26–29.

8. Oleshickij S.V., Dremov A.B. Polnoupavljaemye avtomobili [Fully controlled cars]. *V sbornike: Budushhee nauki – 2018. Sbornik nauchnyh statej 6-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. V 4-h tomah. Otvetstvennyj redaktor A.A. Gorohov*. 2018: 217–220.

9. Sundar S., Sudarsanan T., Krishnan R. Review of Design and Fabrication of four wheel Steering system. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*. 2018; Volume 04, Issue 10: 1034–1049.

10. Serikova I.A. Dinamicheskaya ustojchivost' avtomobilej s vsekolesnym rulevym upravleniyem [Dynamic stability of all-wheel steering

vehicles]. *Avtomobil' i Elektronika. Sovremennyye Tekhnologii*. 2012; 1 (3): 24–29.

11. Pilisiewicz J., Kaczyński R. Geometric analysis of maneuverability performance for vehicles with two steering axles. *TRANSPORT PROBLEMS*. 2017; V. 12, – Issue 2: 43 – 52. DOI: 10.20858/tp.2017.12.2.5

12. Singh A., Kumar A., Chaudhary R., Singh R. Study of 4 Wheel Steering Systems to Reduce Turning Radius and Increase Stability. *International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014)*. 2014; 96–102. ISBN 978-93-5156-328-0

13. Ai, Y., Zhou, Q., & Zhang, H. A New Simulation Model for 4WS Vehicles based on Dynamic Tire Friction Model. *2nd IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*. 2006: pp. 1–6.

14. Zharif M., Ogino H., Ishak M. Research on Steering Control of a 4 Wheel Steering Electric Vehicle with Intelligence Steering Control System. *Proceedings of the School of Engineering Tokai University*. 2015; Ser. E 40: pp. 71–75

15. Sethupathi A., Chandradass B., Praketh J., Asuthkar G., Kumar M. Design and fabrication of four wheel steering system for light motor vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019: pp. 1202–1217. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012185.

16. X. Tu, J. Lie. Robust navigation control of a 4WD/4WS agricultural robotic vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019: pp. 164–175. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104892.

17. Amdouni I., Jeddi N., Amraoui L. Optimal control approach developed to Four-Wheel Active Steering Vehicle // *IEEE*. 2016: pp. 1–6, DOI: 10.1109/ICMSAO.2016.6552547

18. Allwright J. Four Wheel Steering (4WS) on a Formula Student Racing Car. *VTE-J*. 2015; Vol. 1, №1: pp. 3–12.

19. Litvinov A.S. *Upravlyayemost' i ustoychivost' avtomobilya*. – M.: *Mashinostroyeniye*, 1971. – 416 p.

20. Antonov D.A. *Teoriya ustoychivosti dvizheniya mnogoosnykh avtomobiley*. – M.: *Mashinostroyeniye*, 1973. – 216 p.

21. Gorelov V.A., Naumov V.N. *Vsekolesnoye upravleniye: povорот k manevrennosti*. *Mir transporta*, 2008, No2: pp. 28 – 35.

22. Tan Y., Guo Sh., Hong Y. Sliding-mode control of four wheel steering systems. *ICMA*. 2017: pp. 1250–1255. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015996.

23. Tirumala A., Anurag J. Analysis of a four-wheeled steering mechanism for automobiles. *AIP Conference Proceedings*. 2019: 2148–2161. DOI: 10.1063/1.5123976.

**Поступила 15.10.2018, принята к публикации 25.10.2019.**

**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**

*Маркина Анастасия Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, ORCID 0000-0002-0461-9543, (г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: aa.akulova@urfu.ru).*

*Чепкасов Сергей Николаевич – старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, инженер-конструктор ПАО «МЗиК» (г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: 79502027731@ya.ru).*

*Бережная Мария Александровна – студентка 4-го курса направления 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, (г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: Marria-1998@mail.ru).*

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Anastasia A. Markina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Transporting and Lifting Machines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (19, Mira St., e-mail: aa.akulova@urfu.ru).*

*Sergei N. Chepkasov – Senior Lecturer of the Transporting and Lifting Machines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (19, Mira St., e-mail: 79502027731@ya.ru).*

*Maria A. Berezhnaya – Student of the Transporting and Lifting Machines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (19, Mira St., e-mail: Marria-1998@mail.ru).*

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Маркина А. А. Постановка целей и задач исследования, обзор зарубежной литературы, анализ геометрии поворота и нахождения расчетных зависимостей.*

*Чепкасов С.Н. Получение исходных данных для расчета, расчет параметров маневренности и управляемости по полученным исходным данным.*

*Бережная М.А. Обзор отечественной литературы, выполнение расчетных схем.*

#### AUTHORS' CONTRIBUTION

*Anastasia A. Markina – research aim's statement; review of foreign literature; analysis of the motion parameters and finding of the calculated dependencies.*

*Sergei N. Chepkasov – obtaining of the initial data for calculation; calculation of maneuverability and controllability parameters.*

*Maria A. Berezhnaya – literature review; design schemes' implementation.*

# РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОБЕНЗОНАСОСА

А.В. Пузаков

Оренбургский государственный университет,  
г. Оренбург, Россия  
and-rew78@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Значительная доля неисправностей топливного насоса связана с электродвигателем (около 40%), техническое состояние которого определяется величиной электрического сопротивления цепи обмотки. Однако непосредственное измерение электрического сопротивления без снятия с автомобиля затруднено, поэтому диагностировать работоспособность электродвигателя (и насоса в целом) можно по величине потребляемого тока.

**Материалы и методы.** Для ускорения эксперимента и установления точных границ работоспособности электродвигателя использовано физическое моделирование неисправностей с помощью регулируемого активного сопротивления. Критерием работоспособности электрического топливного насоса может служить значение развиваемого давления не менее 0,25 МПа.

**Результаты.** Увеличение последовательно включенного сопротивления приводит к снижению потребляемой насосом силы тока, а также к снижению его производительности. При достижении критического значения сопротивления 11,2 Ом насос переставал работать. Уменьшение параллельно включенного сопротивления тоже приводит к снижению потребляемой силы тока насосом, поскольку значительная его часть идет в обход электродвигателя через сопротивление. При достижении критического значения сопротивления 0,2 Ом насос переставал работать.

**Обсуждение и заключение.** Разработана математическая модель работоспособности электродвигателя топливного насоса, позволяющая определить его техническое состояние как с помощью величины электрического сопротивления, так и с помощью потребляемого тока. Измерение силы тока, используемого электродвигателем, может служить основой метода диагностирования электрических топливных насосов непосредственно на автомобиле, снижая трудоемкость и простои автомобилей в ремонте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электрический топливный насос, электродвигатель, неисправности, физическое моделирование неисправностей, потребляемый ток.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Выражаю благодарность анонимным рецензентам.

© А.В. Пузаков



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## AUTOMOTIVE ELECTRIC FUEL PUMP'S FAULTS: RESULTS OF THE PHYSICAL MODELING

**A.V. Puzakov**

Orenburg State University,  
Orenburg, Russia  
and-rew78@yandex.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** A significant proportion of the fuel pump's faults is associated with an electric motor (about 40%), the technical condition of which is determined by the value of the electrical resistance of the winding circuit. However, direct measurement of electrical resistance without removing the vehicle is difficult. Therefore, it is possible to diagnose the performance of the electric motor (and the pump as a whole) by the amount of consumed current.

**Materials and methods.** The author used physical modeling of faults by adjustable resistance for acceleration of the experiment and establishment of precise limits in the efficiency of the electric motor. The criterion for the operability of an electric fuel pump was the value of the developed pressure of at least 0.25 MPa.

**Results.** An increase in the series-connected resistance led to a decrease in the current consumption of the pump, as well as a decrease in its performance. When the critical resistance value reached 11.2 ohms, the pump stopped working. A decrease in the resistance connected in parallel also led to a decrease in the current consumed by the pump since a significant part of it is bypassing of the electric motor through resistance. When the critical resistance value of 0.2 Ohm was reached, the pump stopped working.

**Discussion and conclusions.** As a result, the author develops the mathematical model of the electric motor's efficiency, which allows determining its technical condition by the usage both the value of electrical resistance and the consumed current. Moreover, measuring the current consumed by an electric motor serves as the basis for diagnosing electric fuel pumps directly on a vehicle and reduces the labor intensity and downtime of vehicles under repair.

**KEYWORDS:** electric fuel pump, electric motor, failures, physical modeling of failures, consumed current.

**ACKNOWLEDGEMENTS.** The author expresses his gratitude to the reviewers of the paper.

© A.V. Puzakov



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

**ВВЕДЕНИЕ**

Электрический топливный насос – это главный компонент топливной системы автомобиля, который подает топливо в топливную рампу, а из нее во впускной коллектор двигателя. Все современные автомобили оснащены электрическими топливными насосами, выполняющими роль основного нагнетателя в бензиновых двигателях с распределенным впрыском, или роль топливоподкачивающих в дизельных двигателях и бензиновых двигателях с непосредственным (прямым) впрыском [1]. Снижение работоспособности электрического топливного насоса ведет к потере давления в системе топливоподдачи, повышению токсичности отработавших газов, снижению экономичности двигателя. Так как процедура замены топливного насоса обладает значительной трудоемкостью (в среднем 0,7 чел.-ч) [2] и затруднена в полевых условиях, то актуальной становится задача оперативного диагностирования технического состояния электрического топливного насоса.

К причинам нарушения работоспособности электрического топливного насоса можно отнести некачественное топливо, нарушения правил эксплуатации (работа двигателя с не-

допустимо низким уровнем топлива), низкое качество комплектующих, естественный износ деталей<sup>1</sup> [3]. Это способствует возникновению в топливных насосах следующих неисправностей (рисунок 1).

Вышеперечисленные неисправности проявляются следующим образом: снижение мощности двигателя (28%), нестабильность работы двигателя (21%), повышенный расход топлива (14%), затрудненный пуск двигателя (12%), повышенный шум (10%), запах топлива (10%) и др. [4].

Исследованиями работоспособности электрических топливных насосов занимались отечественные и зарубежные ученые [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Установлено, что для диагностирования электрических топливных насосов в настоящее время применяются следующие методы: по величине давления; по количеству топлива в открытый топливопровод; контроля напряжения и тока питания топливных насосов; по величине и форме импульсов наведенных волн от колебания топлива; по шуму и вибрациям.

В патенте [13] автор предлагает исследовать состояние топливной системы на основе вычисления коэффициента полезного дей-

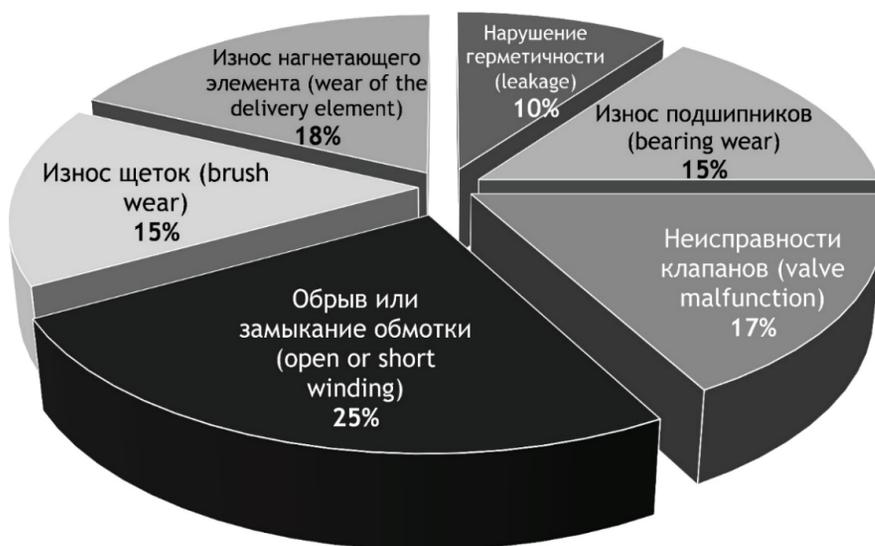


Рисунок 1 – Распределение неисправностей электрических топливных насосов

Figure 1 – Fault distribution of electric fuel pumps

<sup>1</sup> Плаксин А.М., Власов Д.Б. Исследования электрических топливных насосов топливной системы автомобилей // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XII Национальной научно-практической конференции с международным участием. Тюмень, ТИУ, 2019. С. 221–228.

ствия (КПД). Гидравлическая мощность ( $P_{hyd}$ ) в топливной системе и электрическая мощность ( $P_{el}$ ) электрического топливного насоса сравниваются друг с другом. Если отклонения значений эффективности превышают границы пороговых значений, то это означает наличие неисправности. Недостатком метода является необходимость встраивания амперметра в цепь электродвигателя топливного насоса и необходимость расчётных процедур.

А.В. Гриценко в статье «Исследование режимов работы электрических бензиновых насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления» [14] изложил исследования комплексных выходных параметров электрических насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления в линии нагнетания. Автор установил, что наиболее

чувствительной к изменению гидравлического сопротивления является разность величин токов при одинаковой величине напряжения питания топливного насоса. Однако в данных исследованиях помимо влияния засоренности топливного тракта не рассмотрены другие неисправности топливных насосов.

В статье «Технологии диагностирования технического состояния электрических бензонасосов автомобилей с микропроцессорной системой управления» [15] автор Д.Б. Власов представил способ диагностирования топливной магистрали путем нахождения взаимосвязи между вращением коленчатого вала двигателя и напряжением электробензонасоса.

На работающем двигателе выключили три свечи зажигания и изменили положение дроссельной заслонки, то есть объем подаваемого топлива (рисунок 2). Получена зависимость

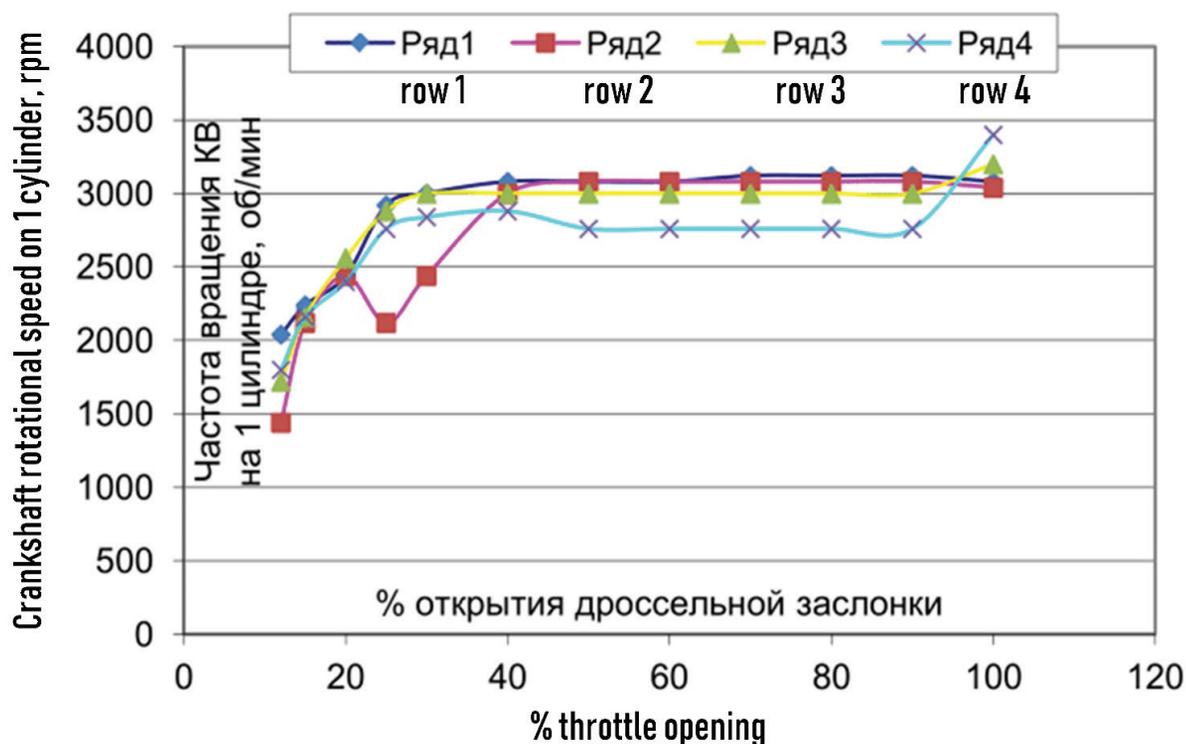


Рисунок 2 – Изменение частоты вращения коленчатого вала в зависимости от степени открытия дроссельной заслонки [16]:

ряд 1 – частота вращения КВ при работе двигателя на 1-м цилиндре; ряд 2 – частота вращения КВ при работе двигателя на 2-м цилиндре; ряд 3 – частота вращения КВ при работе двигателя на 3-м цилиндре; ряд 4 – частота вращения КВ при работе двигателя на 4-м цилиндре

Figure 2 – Crankshaft's speed changing depending on the degree of throttle opening: row 1 – crankshaft rotational speed when the engine is operating on the 1st cylinder; row 2 – crankshaft rotational speed when the engine is running on the 2nd cylinder; row 3 – crankshaft rotational speed when the engine is running on the 3rd cylinder; row 4 – crankshaft rotational speed when the engine is running on the 4th cylinder

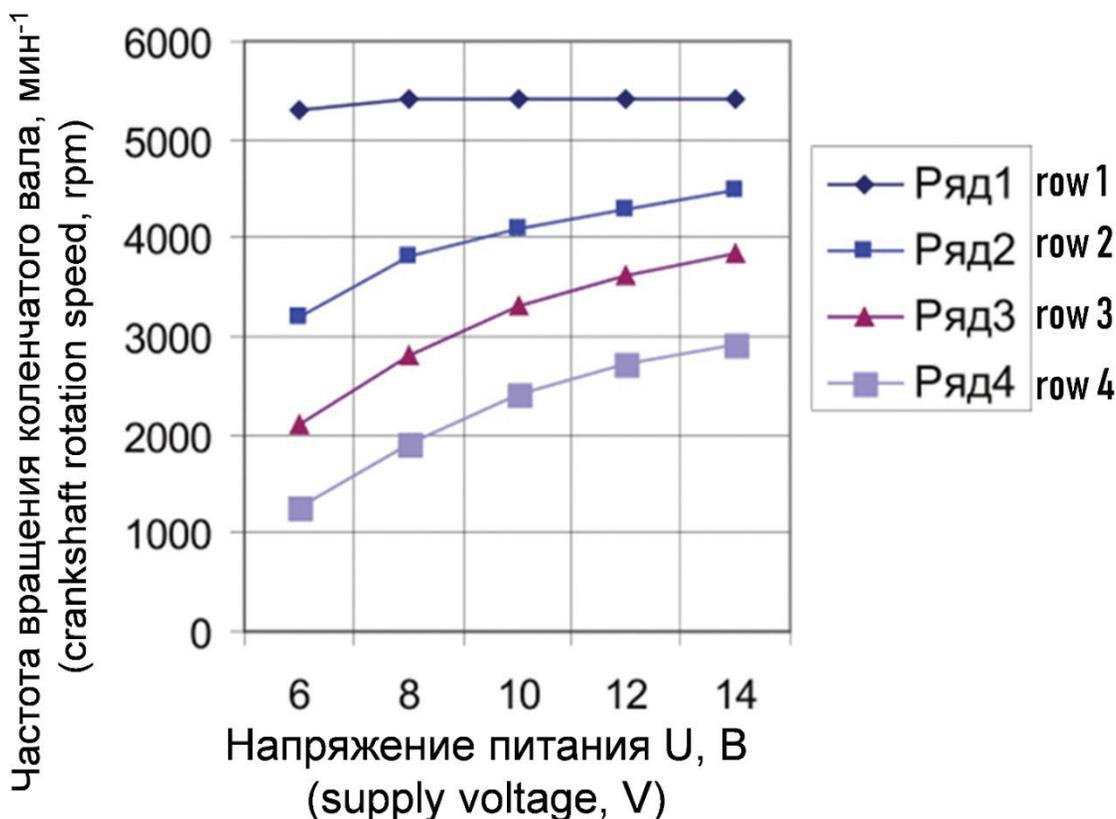


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость максимально развиваемой частоты вращения ДВС от напряжения питания топливного насоса [17]

Figure 3 – Experimental dependence of the maximum developed engine speed of rotation on the supply voltage of the fuel pump

изменения частоты вращения коленчатого вала от степени открытия дроссельной заслонки на работающем двигателе с одним цилиндром. Данная характеристика отображает работу двигателя при использовании нового топливного насоса.

Далее зная, что давление зависит от частоты вращения крыльчатки внутри насоса, автор искусственно воссоздал неисправный топливный насос путем понижения напряжения на его выводах. Чем ниже напряжение, тем меньше производительность насоса. Автор утверждает, что можно исследовать колебания частоты вращения коленчатого вала двигателя в зависимости от параметров работы электрического топливного насоса. Если насос имеет значительный износ, двигатель перестает запускаться.

А.В. Гриценко в статье «Результаты исследования выходных характеристик электрических насосов автомобилей при имитации

сопротивления в нагнетательном топливопроводе» [16] доказывает, что диагностировать топливный насос можно при помощи отключения электромагнитных форсунок.

Для эксперимента были выбраны 10 насосов с разной степенью исправности: 1 – технически исправный топливный насос; 2 – на 40% сниженная производительность; 3 – на 60% сниженная производительность; 4 – на 70% сниженная производительность; 5 – на 80% сниженная производительность. Затем каждый из них подключался к автомобилю, и путем понижения напряжения от 14 В до 6 В производились замеры по оборотам автомобиля (рисунок 3).

Таким образом, диагностирование технического состояния ЭБН осуществляют по измерению максимально возможной частоты вращения ДВС при работе на одном цилиндре (при 100% открытой дроссельной заслонке).

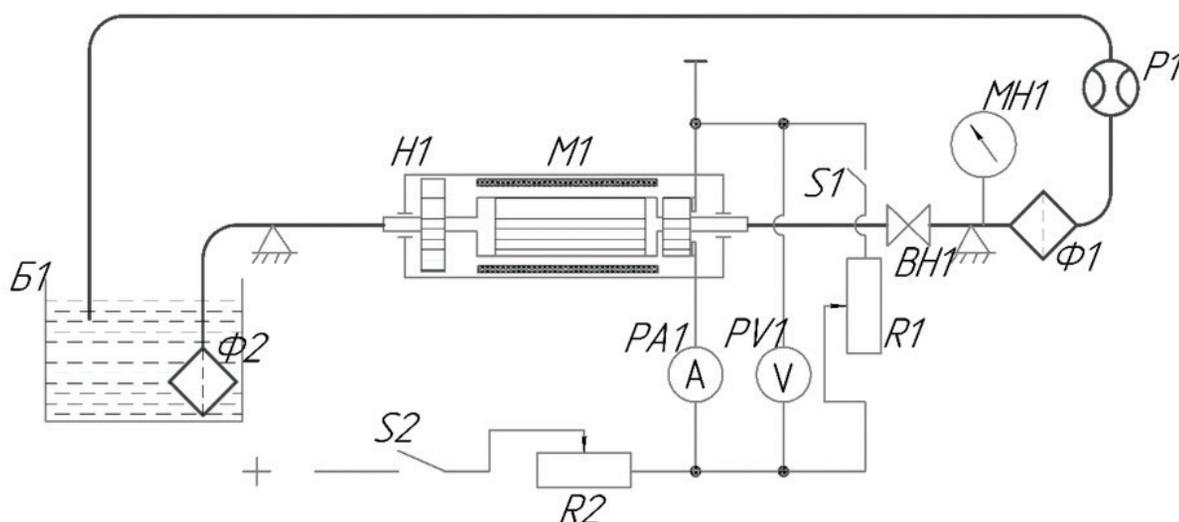


Рисунок 4 – Электрогидравлическая схема стенда:  
H1 – насосная часть; M1 – электродвигатель топливного насоса; S1, S2 – выключатель; MH1 – манометр;  
P1 – жидкостный ротаметр; BH1 – вентиль; Φ1, Φ2 – фильтр; PA1 – амперметр; PV1 – вольтметр;  
R1, R2 – реостат; B1 – бак открытого типа

Figure 4 – Electro-hydraulic scheme of the stand:  
H1 – pumping part; M1 – electric motor fuel pump; S1, S2 – switch;  
MH1 – manometer; P1 – liquid rotameter; BH1 – valve; Φ1, Φ2 – filter; PA1 – ammeter; PV1 – voltmeter;  
R1, R2 – rheostat; B1 – open type tank

Динамика снижения частоты вращения коленчатого вала ДВС в зависимости от напряжения питания электробензонасоса также характеризует степень износа электробензонасоса. Предельной величиной диагностического параметра является  $\Delta n = 600 \text{ мин}^{-1}$  (при 40% износе топливного насоса – снижение коэффициента запаса на 1,4).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки технического состояния электрических топливных насосов разработан стенд<sup>2</sup>, включающий в себя емкость с тестовой жидкостью, фильтры, топливный насос 0 580 454 035 BOSCH, жидкостный ротаметр, манометр (рисунок 4). К основным характеристикам насоса можно отнести напорно-расходную ха-

рактеристику и зависимость потребляемого тока (рисунок 5).

Исправный топливный насос характеризуется следующими значениями параметров: при давлении в топливной системе (на манометре) 294,2 кПа (3,0 кгс/см<sup>2</sup>) производительность, измеренная жидкостным ротаметром, должна составлять не менее 110 дм<sup>3</sup>/ч, потребляемый ток (на амперметре) при этом должен быть не более 6,5 А<sup>3</sup>.

При напряжении питания 6 В электрический топливный насос должен создавать в напорной топливной магистрали давление не менее 245,17 кПа (2,5 кгс/см<sup>2</sup>) без учета производительности. Область допустимых значений заштрихована на рисунке 5.

<sup>2</sup> Чернышов Д.А., Пузаков А.В. Разработка стенда для параметрических испытаний топливных насосов автомобильных двигателей // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург : ОГУ, 2019. С.1590–1594.

<sup>3</sup> Чернышов, Д.А., Пузаков А.В. Параметрические испытания автомобильных электробензонасосов // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 351–354.

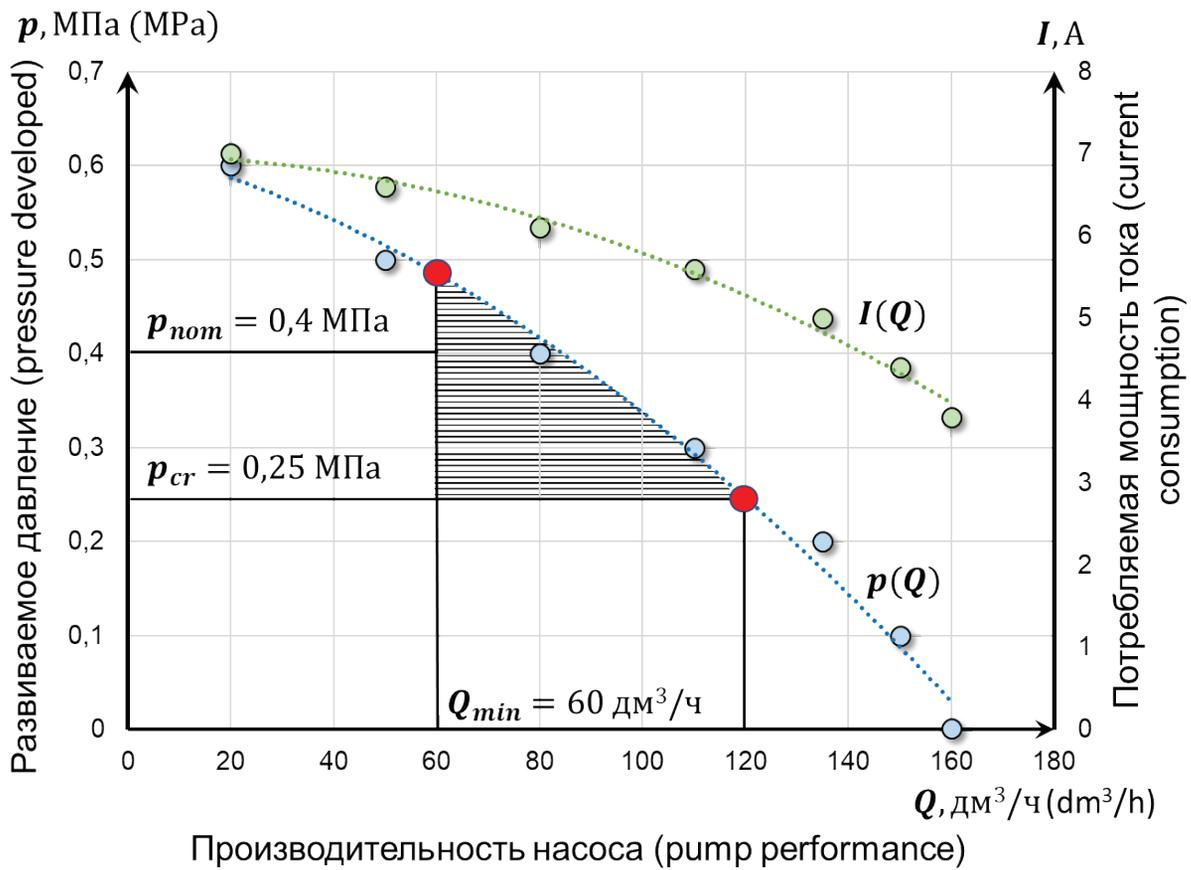


Рисунок 5 – Характеристики исправного электрического топливного насоса

Figure 5 – Characteristics of a good electric fuel pump

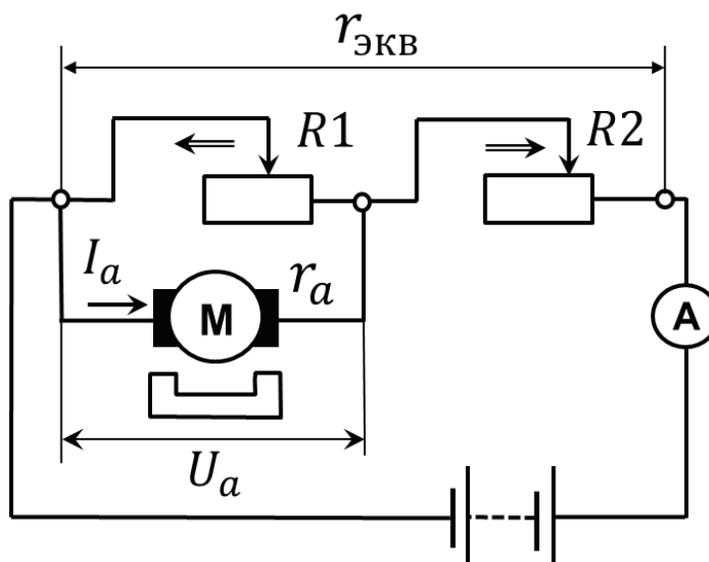


Рисунок 6 – Включение регулируемого сопротивления (реостата) при физическом моделировании неисправностей электродвигателя топливного насоса

Figure 6 – Turn on adjustable resistance (rheostat) in the physical modeling of the fuel pump's faults

Моделирование электрических неисправностей представляет собой процесс имитирования реальных процессов, происходящих с изоляцией обмотки электродвигателя топливного насоса [17].

Разница между моделью и реальным процессом заключается в продолжительности развития неисправности. Старение изоляции происходит при продолжительной эксплуатации, перегрузках и других аномальных режимах. Процесс этот занимает долгое время, и чтобы отследить его необходимо большое количество измерений, с большим интервалом между замерами.

Для ускорения процесса получения информации используются методы физического и имитационного моделирования, преимуществами которых можно считать значительное ускорение эксперимента, возможность моделирования совокупности ряда неисправностей, а также установление четкой границы между работоспособным и неработоспособным состоянием электродвигателя топливного насоса.

Физическое моделирование обрыва обмотки электродвигателя осуществляется принудительным увеличением сопротивления исследуемого элемента путем последовательного включения с ним регулируемого активного сопротивления (реостат R2, рисунок 6). Для моделирования межвитковых замыканий обмотки электродвигателя сопротивление ее уменьшается путем параллельного включения регулируемого активного сопротивления (реостат R1, рисунок 6).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты физического моделирования неисправностей электродвигателя топливного насоса представлены на рисунках 7 и 8. Критерием работоспособности электрического топливного насоса выступает развиваемое давление, снижение которого ниже величины 0,25 МПа является недопустимым. На рисунке 7 обозначены области, соответствующие работоспособному, неисправному и прекращению работы насоса, границы между которыми установлены исходя из вышеназванного критерия.

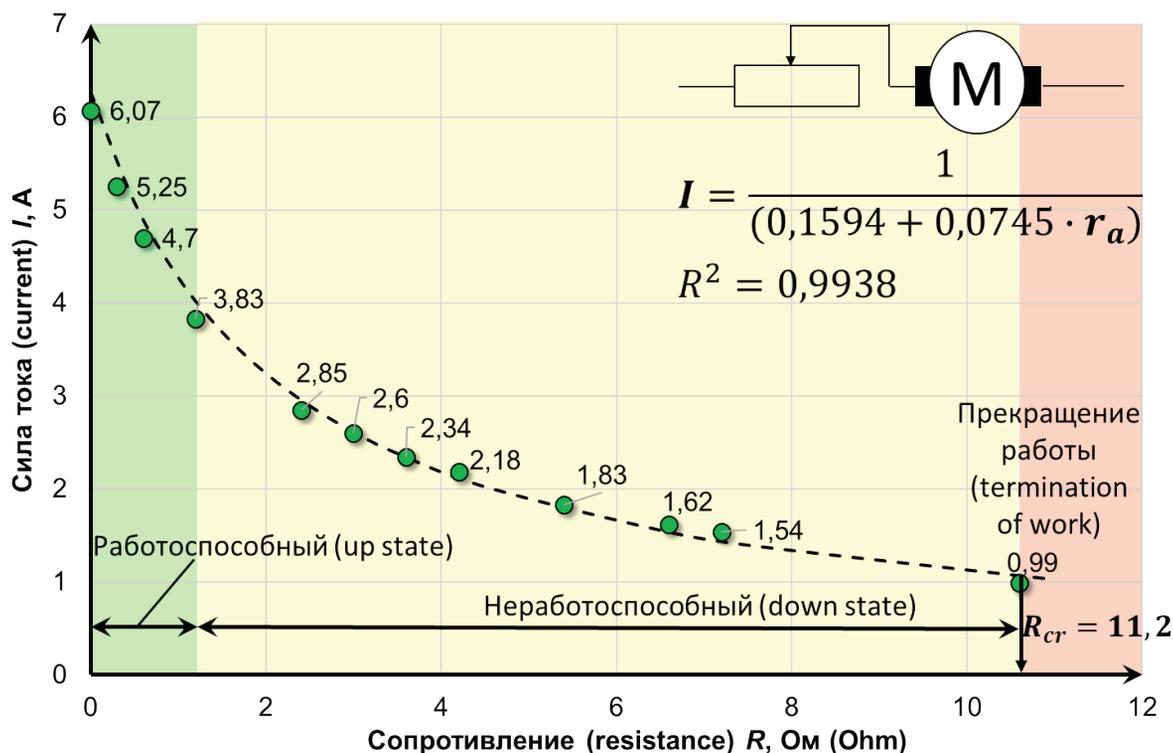


Рисунок 7 – Результаты физического моделирования обрыва обмотки электродвигателя топливного насоса

Figure 7 – Physical modeling results of the winding breakage of the fuel pump's electric motor

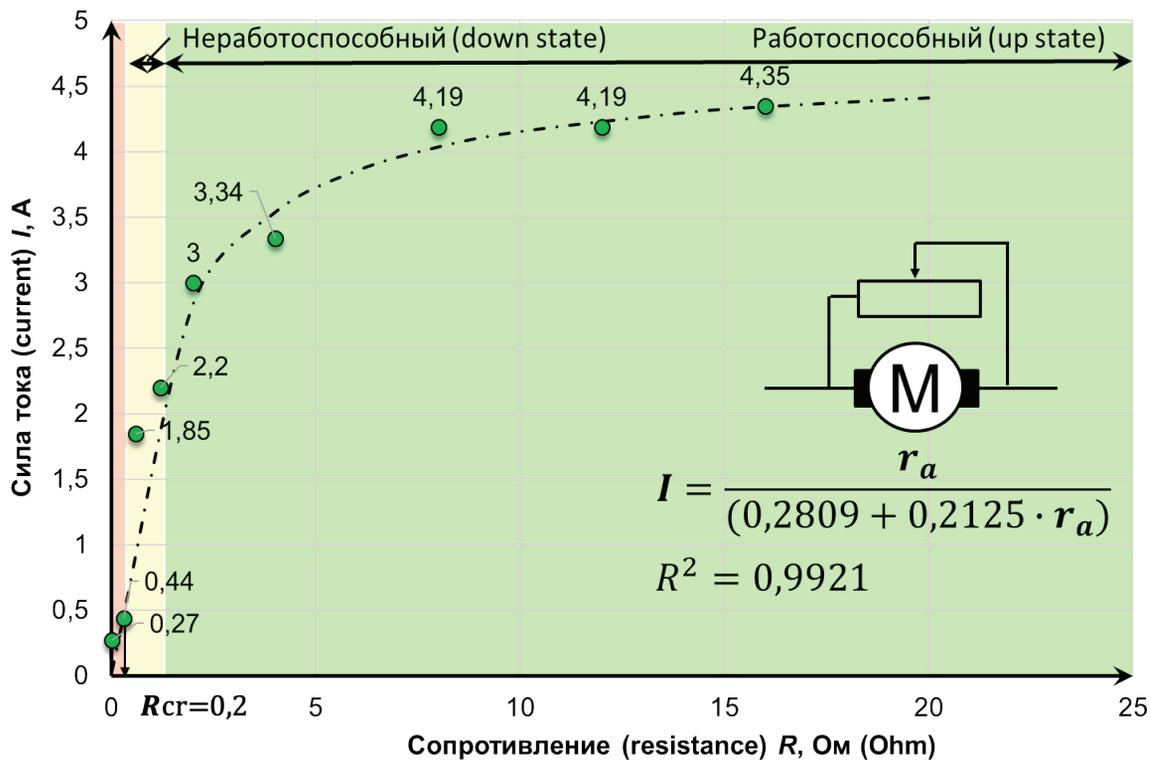


Рисунок 8 – Результаты физического моделирования замыкания обмотки электродвигателя топливного насоса

Figure 8 – Physical modeling results of the winding circuit of the fuel pump's electric motor

При этом исправным считается насос без подключения внешнего сопротивления; работоспособным – обеспечивающий необходимое минимальное давление; неработоспособным – работающий насос, не развивающий необходимое давление.

Увеличение последовательно включенного сопротивления приводит к снижению потребляемой насосом силы тока, а также к снижению его производительности. При достижении критического значения сопротивления 11,2 Ом насос переставал работать (см. рисунок 7).

При моделировании короткого замыкания обмотки электродвигателя (см. рисунок 8) регулируемое активное сопротивление включалось параллельно. Уменьшение сопротивления приводило к уменьшению потребляемой насосом силы тока, поскольку значительная его часть проходила в обход электродвигателя через сопротивление. При достижении критического значения сопротивления 0,2 Ом насос переставал работать.

Таким образом, основным диагностическим параметром работоспособности электродвигателя топливного насоса можно считать силу тока  $I$ , которая зависит от напряжения питания, сопротивления обмотки и давления в топливной системе.

Сила тока электродвигателя электрического топливного насоса  $I$ , А:

$$I = f(U, r_a, p), \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение питания, В;  
 $r_a$  – сопротивление обмотки электродвигателя, Ом;  
 $p$  – развиваемое давление, МПа.

Анализ регрессионных зависимостей позволил представить силу тока в виде математической модели

$$I = \frac{U \cdot (a_1 + p) \cdot r_a}{a_2 + a_3 \cdot r_a}, \quad (2)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты уравнения регрессии.

**Таблица**  
Критерии работоспособности электродвигателя топливного насоса

Table  
Operability criteria of the fuel pump's electric motor

Состояние электродвигателя ЭБН		
Короткое замыкание	Исправный	Обрыв обмотки
= (0,6 – 0,4) Ом – работоспособный	= 0,6±0,05 Ом	= (0,6 – 1,8) Ом – работоспособный
= (0,4 – 0,2) Ом – неработоспособный		= (1,8 – 11,2) Ом – неработоспособный
< 0,2 Ом – прекращение работы		> 11,2 Ом – прекращение работы

Допущением математической модели является непрерывность изменения параметров, а ограничения следующие:  $I = (0,27 - 6,07)$  А,  $U = (6 - 14)$  В,  $r = (0,01 - 18)$  Ом,  $p = (0 - 0,6)$  МПа.

Согласно полученным результатам (таблица) величина сопротивления обмотки электродвигателя, изменяясь при возникновении неисправностей, также может служить диагностическим параметром. Сопротивление обмотки электродвигателя исправного топливного насоса составляет  $0,6 \pm 0,05$  Ом. При возникновении таких неисправностей как износ щёток, ослабление щёточных пружин происходит увеличение сопротивления, крайним случаем которого является обрыв.

Возникновение межвитковых замыканий обмотки и замыкание на корпус характеризуется уменьшением сопротивления обмотки.

Таким образом, диагностическими параметрами электродвигателя топливного насоса могут выступать как структурный параметр – сопротивление обмотки электродвигателя, – так и диагностический параметр – сила потребляемого тока, – причем измерение силы тока можно производить непосредственно на автомобиле без снятия топливного насоса с помощью токоизмерительных клещей.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Значительная доля неисправностей топливного насоса связана с электродвигателем (около 40%), техническое состояние которого определяется величиной электрического сопротивления цепи обмотки. Однако непосредственное измерение электрического сопротивления без снятия с автомобиля затруднено,

поэтому диагностировать работоспособность электродвигателя (и насоса в целом) можно по величине потребляемого тока.

2. Для ускорения эксперимента и установления точных границ работоспособности электродвигателя использовано физическое моделирование неисправностей с помощью регулируемого активного сопротивления. Критерием отказа электрического топливного насоса служит снижение развиваемого давления ниже величины 0,25 МПа.

3. Для моделирования неисправности электродвигателя последовательно или параллельно с ним включается регулируемое активное сопротивление. Увеличение последовательно включенного сопротивления приводит к снижению потребляемой насосом силы тока, а также к снижению его производительности. При достижении критического значения сопротивления 11,2 Ом насос переставал работать. Уменьшение параллельно включенного сопротивления тоже приводило к снижению потребляемой силы тока насосом, поскольку значительная его часть проходила в обход электродвигателя через сопротивление. При достижении критического значения сопротивления 0,2 Ом насос переставал работать.

4. Согласно полученным результатам величина сопротивления электродвигателя, изменяясь при возникновении неисправностей, может служить диагностическим параметром. Сопротивление исправного насоса составляет 0,6 Ом. При возникновении таких неисправностей как износ щёток, ослабление щёточных пружин происходит увеличение сопротивления, крайним случаем которых является обрыв. Возникновение межвитковых

замыканий обмотки и замыкание на корпус характеризуется уменьшением сопротивления обмотки.

5. Измерение силы тока, потребляемого электродвигателем, может служить основой метода диагностирования электрических топливных насосов непосредственно на автомобиле, снижая трудоемкость и простои автомобилей в ремонте.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Electric Fuel Pumps – Models, Damage, Reasons. 4th Edition. – MS Motorservice International GmbH, 2015. 52 p.

2. Залознов И.П., Тегжанов А.С., Тыштыков Ж.М. Диагностика электрического бензинового насоса системы впрыска топлива // Сборник научных трудов SWorld. 2014. Т. 2. № 3. С. 47–51.

3. Власов Д.Б. Комплексное диагностирование электрического бензонасоса системы топливоподачи диагностирования / Д.Б. Власов, А.М. Плаксин, А. В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Д. Бакайкин, С.П. Хвостов, Д. А. Абросимов, К.А. Цыганов // Фундаментальные исследования. 2014. №11,12. С. 2610–2614.

4. Гриценко А.В. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования / А.В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Б. Власов // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт. 2018. №11. С. 50–57.

5. Глемба К.В. Диагностирование электрических насосов по силе тока питания при сопротивлении в топливосистеме / К.В. Глемба, А.В. Гриценко, К.А. Цыганов, Д.Б. Власов // Евразийское Научное Объединение. 2015. Т. 1. № 11 (11). С. 16–18.

6. Li Ma, Zhao & Dong Zhang, Zhen. (2012). Research and Design of Electric Fuel Pump Testing System. *Advanced Materials Research*. 510. 123–127. 10.4028/www.scientific.net/AMR.510.123.

7. Zhao, Q.-P & Cheng, Z.-S & Chen, H.-X. (2006). Testing system of automobile fuel pump performance based on vacuum method. 28. 108–110.

8. Adhikari, Saurav & Sachdeva, Nilesh & Prajapati, Dr. D R. (2017). Root cause analysis of defects in automobile fuel pumps: a case

study. *International Journal of Management, IT & Engineering*. 7. 90–104.

9. Pattipati, Bharath & Pattipati, Krishna & Ghoneim, Youssef & Howell, Mark & Salman, Mutasim. (2013). Electronic Returnless Fuel System Fault Diagnosis and Isolation: A Data-Driven Approach. PHM 2013 - Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2013.

10. B. Vlasov, D & G. Ignatiev, A & V. Almetova, Z. (2019). Methodological Aspects of Diagnostics of Electric Gasoline Pumps in Operation of Automobiles: ICIE 2018. 10.1007/978-3-319-95630-5\_236.

11. Бабашев К.А., Азимов М.Б. Моделирование и оптимальное управление процессами функционирования электрической системы топливного насоса // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2017. №1(7). С. 35–40.

12. Attar, Batoul & Mare, Jean-Charles. (2017). Assessment of Electric Drive for Fuel Pump using Hardware in the Loop Simulation. 320-331. 10.3384/ecp17144320.

13. Kossira S. Verfahren zur Bestimmung eines Fehlerzustands eines Kraftstoffördersystems mit einem Kraftstofffilter. Patent. DE, no. 102006004296A1, 2006.

14. Гриценко А.В., Глемба К.В., Ларин О.Н. Исследование режимов работы электрических бензиновых насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. №2(30). С. 47–55.

15. Власов Д.Б. Технологии диагностирования электрических бензиновых насосов / Д.Б. Власов, Н. Машрабов, А.М. Плаксин, Д.Д. Бакайкин, А.В. Гриценко // АПК России. 2019. №26/1. С. 51–55.

16. Гриценко А.В. Результаты исследования выходных характеристик электрических насосов автомобилей при имитации сопротивления в нагнетательном топливопроводе / А.В. Гриценко, А.М. Плаксин, К.В. Глемба, И.Г. Ганиев, К.И. Лукомский // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 991–993.

17. Филатов М.И., Пузаков А.В. Имитирование неисправностей как инструмент диагностирования автомобильных генераторов // Автомобильная промышленность. 2016. № 1. С. 22–26.

REFERENCES

1. Electric Fuel Pumps – Models, Damage, Reasons. 4th Edition. – MS Motorservice International GmbH, 2015. 52 p.
2. Zaloznov I.P., Tegzhanov A.S., Tyshtykov Zh.M. Diagnostika jelektricheskogo benzinovogo nasosa sistemy vpryska topliva [Diagnostics of the electric gasoline pump of the fuel injection system]. *Collected scientific works of SWorld*. 2014; 2, no 3: 47–51 (in Russian).
3. Vlasov D.B., Plaksin A.M., Gritsenko A.V., Glemba K.V., Bakaykin D.D., Khvostov S.P., Abrosimov D.A., Tsyganov K.A. Kompleksnoe diagnostirovanie jelektricheskogo benzonasosa sistemy toplivopodachi diagnostirovanija [Comprehensive diagnosis of the electric fuel pump of the fuel supply system]. *Basic research*. 2014; 11-12: 2610–2614 (in Russian).
4. Gritsenko A.V., Glemba K.V., Vlasov D.B. Vyjavlenie skrytyh otkazov jelektricheskikh toplivnyh nasosov mobil'nyh jenergeticheskikh sredstv v sel'skom hozjajstve metodom testovogo diagnostirovanija [Detection of hidden failures of electric fuel pumps of mobile power facilities in agriculture by the method of test diagnostics]. *Electrical equipment: operation and repair*. 2018; 11: 50–57 (in Russian).
5. Glemba K.V., Gritsenko A.V., Tsyganov K.A., Vlasov D.B. Diagnostirovanie jelektricheskikh nasosov po sile toka pitaniya pri soprotivlenii v toplivosisteme [Diagnostics of electric pumps according to the power supply current with resistance in the fuel system]. *Eurasian Scientific Association*. 2015; 1, no. 11 (11): 16–18 (in Russian).
6. Li Ma, Zhao & Dong Zhang, Zhen. (2012). Research and Design of Electric Fuel Pump Testing System. *Advanced Materials Research*. 510. 123–127. 10.4028/www.scientific.net/AMR.510.123.
7. Zhao, Q.-P & Cheng, Z.-S & Chen, H.-X. (2006). Testing system of automobile fuel pump performance based on vacuum method. 28. 108–110.
8. Adhikari, Saurav & Sachdeva, Nilesh & Prapapati, Dr. D R. (2017). Root cause analysis of defects in automobile fuel pumps: a case study. *International Journal of Management, IT & Engineering*. 7. 90–104.
9. Pattipati, Bharath & Pattipati, Krishna & Ghoneim, Youssef & Howell, Mark & Salman, Mutasim. (2013). Electronic Returnless Fuel System Fault Diagnosis and Isolation: A Data-Driven Approach. *PHM 2013 Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society* 2013.
10. B. Vlasov, D & G. Ignatiev, A & V. Almetova, Z. (2019). Methodological Aspects of Diagnostics of Electric Gasoline Pumps in Operation of Automobiles: ICIE 2018. 10.1007/978-3-319-95630-5\_236.
11. Babashev K.A., Azimov M.B. Modelirovanie i optimal'noe upravlenie processami funkcionirovanija jelektricheskoy sistemy toplivnogo nasosa [Modeling and optimal control of the functioning processes of the fuel pump electrical system]. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2017; 1(7): 35–40 (in Russian).
12. Attar, Batoul & Mare, Jean-Charles. (2017). Assessment of Electric Drive for Fuel Pump using Hardware in the Loop Simulation. 320–331. 10.3384/ecp17144320.
13. Kossira S. Verfahren zur Bestimmung eines Fehlerzustands eines Kraftstoffördersystems mit einem Kraftstofffilter. Patent. DE, no. 102006004296A1, 2006.
14. Gritsenko A.V., Glemba K.V., Larin O.N. Issledovanie rezhimov raboty jelektricheskikh benzinovyh nasosov avtomobilej pri iskusstvennom formirovanii gidravlicheskogo soprotivlenija [Research of the electric petrol pumps' operating modes of cars with artificial formation of hydraulic resistance]. *Bulletin of the Ural State University of Communications*. 2016; 2(30): 47–55 (in Russian).
15. Vlasov D.B., Mashrabov N., Plaksin A.M., Власов, Bakaykin D.D., Gritsenko A.V. Tehnologii diagnostirovanija jelektricheskikh benzinovyh nasosov [Diagnostic technologies for electric petrol pumps]. *Russian agrarian and industrial complex*. 2019; 26/1: 51–55 (in Russian).
16. Gritsenko A.V., Plaksin A.M., Glemba K.V., Ganiev I.G., Lukomsky K.I. Rezul'taty issledovanija vyhodnyh harakteristik jelektricheskikh nasosov avtomobilej pri imitacii soprotivlenija v nagnetatel'nom toplivoprovode [Research's results of the output characteristics of electric pumps with imitation of resistance in the injection fuel line]. *Basic research*. 2014; 11: 991–993 (in Russian).
17. Filatov M.I., Puzakov A.V. Imitirovanie neispravnostej kak instrument diagnostirovanija avtomobil'nyh generatorov [Simulation of faults as a tool for diagnosing automotive generators]. *Automotive industry*. 2016; 1: 22–26 (in Russian).

*Поступила 21.07.2019, принята к публикации 25.10.2019.*

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

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

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

*Пузаков Андрей Владимирович – канд. техн. наук, ORCID ID 0000-0002-9754-8165,*

*Researcher ID G-3297-2015, доц. кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей», Оренбургский государственный университет, (г. Оренбург, пр-т Победы, 13, e-mail: and-rew78@yandex.ru).*

### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*Andrey V. Puzakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Maintenance and Repair, Orenburg State University, ORCID ID 0000-0002-9754-8165, Researcher ID G-3297-2015 (Orenburg, 13, Pobedy Ave., e-mail: and-rew78@yandex.ru).*

**РАЗДЕЛ III.  
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

УДК 625.7:004.9

# ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДОРОЖНОЙ СЕТЬЮ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Т.В. Боброва<sup>1\*</sup>, А.А. Андрюшенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ»

Омск, Россия;

<sup>2</sup> Агентство передовых исследований и разработок (АПИР),

Омск, Россия

\*bobrova.tv@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Анализ наиболее известных моделей управления агломерациями в России и за рубежом показал, что в этой области пока отсутствуют комплексные решения. Проблема информационного моделирования управляющих воздействий на состояние и развитие дорожной сети этих территориальных образований недостаточно изучена и требует дальнейших всесторонних исследований. Цель данной статьи: сформулировать наиболее важные принципы и методические подходы для построения современной информационной системы управления дорожной инфраструктурой городской агломерации.

**Методы и модели.** Проектируемая система опирается на технологии информационного моделирования процессов транспортного взаимодействия между корреспондирующими пунктами. Структура системы выстроена на принципах проектного многоагентного управления. Определены типы математических моделей для решения ключевых задач в рамках проектных модулей: создание транспортного каркаса агломерации; обеспечение нормативных требований транспортно-эксплуатационного состояния дорог; создание условий для непрерывного и безопасного движения автомобильного транспорта.

**Результаты.** Архитектура разработанной системы «Дорожная сеть-6D BIM» отражает связь двух информационных процессов: наполнение системы знаниями и формирование коробочных решений с использованием банка знаний. Применение n-D моделирования базируется на трехмерных проекциях сооружений (3-D) с дополнением технологиями цифрового моделирования: календарных сроков, ресурсов и финансирования объектов в жизненном цикле. Элементы системы были апробированы в ходе эксперимента при реализации проекта комплексного развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации.

**Заключение.** Осуществление проекта «Дорожная сеть-6D BIM» в предлагаемой концепции вносит определенный вклад в решение проблем управления дорожной сетью городской агломерации за счёт повышения уровня интеллектуализации решаемых задач на всех стадиях проектного управления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городская агломерация; дорожная сеть; информационное n-D моделирование; BIM-технология; математические модели; проектные модули.

© Т.В. Боброва, А.А. Андрюшенков



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MANAGING THE ROAD NETWORK OF URBAN AGGLOMERATION: FORMATION OF THE INFORMATION MODELING

T.V. Bobrova<sup>1\*</sup>, A.A. Andryushenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Automobile and Highway University,  
Omsk, Russia

<sup>2</sup>Agency of Research and Development,  
Omsk, Russia

\*bobrova.tv@gmail.com

## ABSTRACT

**Introduction.** An analysis of the most well-known agglomeration management models in Russia and abroad has shown that there are no comprehensive solutions in this area yet. The problem of information modeling of control actions on the state and development of the road network of these territorial entities is not well understood and requires further comprehensive research. The purpose of the paper is to formulate the most important principles and methodological approaches for building a modern information system for managing the road infrastructure of urban agglomerations.

**Methods and models.** The designed system based on information modeling technologies of transport interaction processes between corresponding points. The structure of the system presented on the principles of multi-agent project management. The authors identified the types of mathematical models for solving key problems in the framework of design modules by creation of an agglomeration transport framework, ensuring the regulatory requirements of the transport and operational condition of roads and by creation of conditions for the continuous and safe movement of road transport.

**Results.** The architecture of the "Road Network-6D BIM" developed system reflected the relations of two information processes: filling the system with knowledge and forming box solutions using a knowledge bank. The n-D modeling based on three-dimensional projections of structures (3-D) with the addition of digital modeling technologies: calendar terms, resources and financing of objects in the life cycle. The authors tested system elements during the experiment and the implementation of the project for the integrated development of the transport infrastructure of the Omsk agglomeration.

**Discussion and conclusions.** The implementation of the "Road Network-6D BIM" project in the proposed concept makes a definite contribution to solving the problems of managing the road network of the city agglomeration by increasing the level of intellectualization of the tasks at all stages of project management.

**KEYWORDS:** urban agglomeration, road network, information n-D modeling, BIM technology, mathematical models, design modules.

© T.V. Bobrova, A.A. Andryushenkov



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

### ВВЕДЕНИЕ

Термин «агломерация» (*agglomeration*) происходит от латинского *agglomerare* (присоединять, накапливать) и в общенаучном смысле обозначает процесс связывания первичных элементов под влиянием внешних факторов и взаимодействий в иерархическую структуру более высокого порядка [1]. В научной литературе применительно к населённым пунктам этот термин употребляется с середины XX в. В настоящее время территориальные образования в виде городских агломераций являются распространённой формой организации поселений во многих странах и характеризуют углубление процессов урбанизации. В аналитических документах ОАО «Российский институт градостроительства и инвестиционного развития (Гипрогор)»<sup>1,2,3</sup> городская агломерация рассматривается как «социально-экономическое пространство, формирующееся вокруг одного или нескольких городов-ядер, состоящее из населённых пунктов, объединённых общими элементами инженерной и транспортной инфраструктуры и интенсивными ежедневными/еженедельными связями (трудовыми, экономическими, культурно-бытовыми, рекреационными и прочими).

В соответствии с Указом Президента РФ от 16.01.2017 №13<sup>4</sup> развитие крупных городских агломераций обозначено как необходимое условие «обеспечения экономического роста, технологического развития и повышения инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности российской экономики на мировых рынках». Министерством регионального развития Российской Федерации поставлена задача формирования институциональной среды и единых подходов развития агломераций, стимулирования межмуниципаль-

ного взаимодействия, совершенствования нормативно-правового, бюджетного, градостроительного обеспечения этого процесса<sup>5</sup>. Проекты развития агломераций реализуются в 14 регионах страны. Увеличение числа таких ареалов, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, становится важнейшим направлением государственной политики России. Государственные подходы к управлению развитием агломераций на различных этапах изложены в «Дорожной карте»<sup>6</sup>. Анализ наиболее известных моделей управления агломерациями показывает, что в этой сфере пока не найдено универсальных решений<sup>7</sup> [2, 3]. Схема территориального планирования (СТП) агломерации – один из основных документов, с которого начинается управление развитием агломерации. Выбор методики разработки СТП определяется исходя из конкретных свойств территории, условий проектирования, целей создания агломерационного сообщества. Интересы объединяемых территорий должны быть согласованы между собой, что делает необходимым формирование общей структуры управления агломерацией.

Управление такими сложными структурами невозможно без разработки специальных систем современного информационного обеспечения. Имея общие черты для разных агломерационных композиций, система тем не менее должна отразить особенности взаимодействий составляющих её элементов в конкретных условиях. Проектируемая система является более сложной структурой, чем информационная система одного объекта, построенная по принципам BIM-технологий. В то же время она должна включить эти технологии как применительно к отдельным объектам, так и для общей конструкции системы на принципах про-

---

<sup>1</sup> Развитие городов: лучшие практики и современные тенденции // Выпуск 1 ОАО «Гипродор». URL: <https://drive.google.com/file/d/0B7GEA-M58qzPd3lxYzcv1g5R1E/view>.

<sup>2</sup> Развитие городских агломераций: аналитический обзор // Развитие городских агломераций. Выпуск 2. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B7GEA-M58qzPODFYLTdjOFIJNEk/view>.

<sup>3</sup> Проекты агломерационного развития // Выпуск 3. URL: <https://drive.google.com/file/d/19VILnXseyQjJpyWDy6dvLa9HE5W4bnnj/view>.

<sup>4</sup> Основы государственной политики регионального развития Российской Федерации на период до 2025 г. (утв. Указом Президента РФ от 16.01.2017 №130).

<sup>5</sup> Развитие городских агломераций: аналитический обзор // Развитие городских агломераций. Выпуск 2. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B7GEA-M58qzPODFYLTdjOFIJNEk/view>.

<sup>6</sup> Дорожная карта для субъекта РФ по реализации проекта «Развитие городской агломерации». URL: [https://drive.google.com/file/d/1cfCwpuGG\\_Xcc\\_nQYjNxxZW7vL04BfG45/view](https://drive.google.com/file/d/1cfCwpuGG_Xcc_nQYjNxxZW7vL04BfG45/view).

<sup>7</sup> Развитие городских агломераций: аналитический обзор // Развитие городских агломераций. Выпуск 2. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B7GEA-M58qzPODFYLTdjOFIJNEk/view>.

ектного многоагентного управления. Авторы [4, 5, 6, 7], анализируя проблемы современных конструкций и программного обеспечения BIM, отмечают, что именно эти технологии позволяют координировать и оптимизировать качественные, финансовые, графические, организационные и другие аспекты управления, учитывая социально-культурную среду при внедрении новых технологий. В этой среде развитие транспортных связей является одним из ведущих стратегических направлений. Сбор и обработку большого объема данных о состоянии и изменениях дорожной ситуации в контролируемых районах предполагается выполнять программными агентами с использованием различных автоматических датчиков систем наблюдения. Для выработки управляющих воздействий по результатам мониторинга будут учтены рекомендации авторов [8, 9, 10] о применении методов конвергентного моделирования в рамках интеллектуальных транспортных систем (умная дорога).

Программа управления дорожной инфраструктурой агломерации включает 3 основных направления (подпрограммы), которые реализуются практически одновременно с разной периодичностью и степенью интенсивности:

1. Создание и актуализация транспортного каркаса на основе существующей дорожной сети.

2. Обеспечение транспортно-эксплуатационного состояния сети дорог и их элементов в соответствии с нормативными требованиями.

3. Всесезонное содержание дорожной сети.

При реализации каждого из этих направлений возникает необходимость решения сложных организационных, инженерных и социально-экономических задач, методы и модели, решения которых нашли своё отражение в трудах отечественных и зарубежных ученых. Часть из них реализована на практике и включена в нормативные документы. Цель данной статьи сформулировать наиболее важные принципы и методические подходы к управлению состоянием дорожной сети, позволяющие интегрировать накопленный опыт в области транспортного моделирования для построения концепции современной информационной системы управления городской агломерацией.

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Идеальная транспортная система агломерации должна обеспечивать часовую транспортную доступность города-центра для всех населенных пунктов в ее составе. Важно сформировать единую агломерационную транспортно-логистическую сеть грузового и пассажирского транспорта, интегрированную с федеральной и региональной системами. В процессе разработки транспортных схем рассматривают три уровня коммуникаций с учетом всех видов транспорта: железнодорожного, водного, автомобильного, воздушного (рисунок 1) [3].

Градостроительные решения в области транспортной инфраструктуры должны в определенной степени опережать развитие самой агломерации, чтобы не тормозить её рост в жизненном цикле на период не менее 20–25 лет. Это относится прежде всего к созданию транспортного каркаса территории, формируемого, как правило, на основе существующей дорожной сети с применением математического моделирования (первое направление). Для создания транспортного каркаса многие авторы рекомендуют применение методов гравитационного моделирования и их обобщений в виде моделей «конкурирующих центров», энтропийных моделей прогнозирования перемещений и т.д.<sup>8,9</sup>

Сущность гравитационной модели представлена в виде математической интерпретации второго закона Ньютона. Эта закономерность была установлена на основе эмпирических исследований торговых потоков между городами в США в 20-х годах прошлого века и известна как модель В. Рейли. Сфера применимости этой модели в классическом виде весьма ограничена, но разработаны различные приложения, которые позволяют оценить уровень транспортного взаимодействия между пунктами при разных наборах показателей (численность трудоспособного населения, наличие рабочих мест, величина парка автомобилей и т.д.) В работе<sup>10</sup> установлен экспоненциальный характер функции перемещения населения с трудовыми целями. Исходя из этой предпосылки, формула для определения

<sup>8</sup> Региональная экономика и пространственное развитие. Т.1. Региональная экономика. Теория, модели и методы: учеб. изд. / Л.Э. Лимонов, А. Р. Батчаев, М.П. Березин [и др.] / под общ. ред. Л.Э. Лимонова. М.: Юрайт. 2014. 397 с.

<sup>9</sup> Дингес, Э.В. Методы оценки эффективности дорожных проектов: учеб. пособие / Э.В. Дингес, В.А. Гусейналиев. М.: МАДИ, 2016. 148 с.

<sup>10</sup> Гольц Г. А. Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981. 248 с.

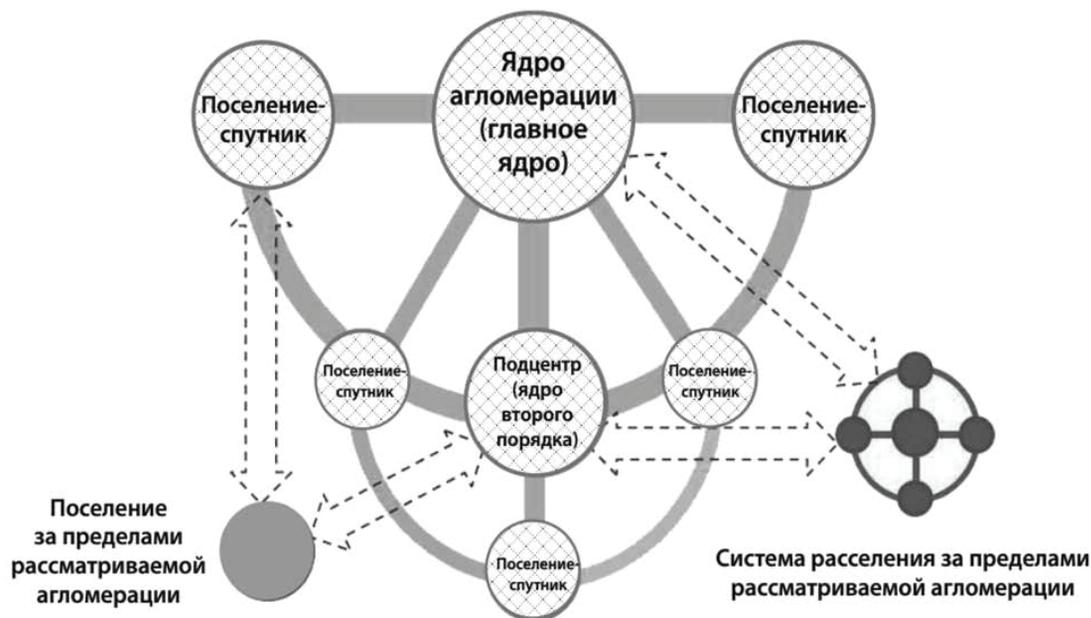
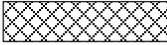
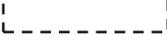


Рисунок 1 – Классификация корреспонденций, рассматриваемых при разработке документов территориально-транспортного планирования. Обозначения:

Figure 1 – Classification of correspondence considered in the development of spatial planning documents. Designations:

-  – Корреспонденции внутри ядер / поселений;  
– Correspondences within cores / settlements;
-  – Агломерационные корреспонденции;  
– Agglomeration correspondence;
-  – Внешние корреспонденции;  
– External correspondence

потока перемещений между корреспондирующими пунктами имеет вид экспоненциальной функции доступности

$$X_{ij} = KA_i B_j e^{-\gamma t_{ij}}, \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  – количество поездок между корреспондирующими пунктами  $i$  и  $j$  в сутки;  $A_i$  – численность работающего населения в пункте  $i$ , чел.;  $B_j$  – потребность рабочих в пункте  $j$ , чел.;  $t_{ij}$  – среднее время перемещения, ч;  $K$  – коэффициент приведения;  $\gamma$  – параметр расселения на территории (определяется на основе транспортных социологических обследований и характеризует уровень экономического развития территории).

Подобные модели и компьютерные технологии использованы для разработки транспортных схем ряда регионов России<sup>11</sup>. К примеру, при определении границ Красноярской агломерации ОАО «Гипрогор» был применен подход, основанный на обследовании пассажиропотоков и анализе всех видов связей между населенными пунктами. Это позволило выделить реальные границы исторически сложившейся агломерации, определяемой как ареал наиболее интенсивных внутриагломерационных социальных и экономических взаимосвязей. Аналогичные подходы использованы при разработке СТП Барнаульской и Читинской агломераций.

При осуществлении программы второго направления основные мероприятия связаны с

<sup>11</sup> Развитие городских агломераций: аналитический обзор // Развитие городских агломераций. Выпуск 2. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B7GEA-M58qzPODFYLTdjOFIJNEk/view>.

улучшением транспортно-эксплуатационных показателей дорог, характеризуемых тремя основными параметрами: интенсивностью, составом и средней скоростью движения автомобилей. Прогноз этих показателей при реализации мероприятий может устанавливаться несколькими методами: многофакторным прогнозированием, экстраполяцией, экспертными оценками и т.д.

Большое внимание при реализации данного направления уделяется диагностике состояния дорог, назначению и обоснованию ремонтных мероприятий, инновационным технологиям для обеспечения прочности и ровности дорожного покрытия в условиях ограничения финансовых ресурсов. Для оценки общественной эффективности дорожных проектов в составе программы работ выполняют сравнение народнохозяйственных затрат и результатов, которые проявляются на транспорте и в нетранспортных отраслях народного хозяйства<sup>12</sup> [11]. В качестве критерия отбора приоритетных инвестиционных проектов при формировании портфеля принят чистый дисконтированный доход.

$$\sum_{i=1}^n \text{ЧДД}_i X_i \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n K_i X_i \leq A, \quad (3)$$

$$X_i \in \{0,1\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где ЧДД<sub>*i*</sub> – чистый дисконтированный доход от реализации *i*-го проекта ( $X_i$ );  $K_i$  – величина требуемых инвестиций для реализации *i*-го инвестиционного проекта;  $A$  – заданный объём финансирования;  $n$  – количество рассматриваемых инвестиционных проектов.

Объём финансирования определяют суммированием средств консолидированного бюджета агломерации на всех уровнях: федеральном, региональном и муниципальном. Методы и модели оптимизации при решении задач многоплановой проблемы повышения технического состояния и воспроизводства дорожной сети рассмотрены в работах [12, 13]. Выбор конкретной модели осуществляют исходя из наличия объективной информации и программного обеспечения.

Главной задачей третьего направления является обеспечение сохранности дорог и дорожных сооружений, поддержание их состояния на уровне, допустимом по условиям непрерывного и безопасного движения в любое время года.

В работе [13] показатель эффективности мероприятий этого направления представлен как функция от ряда характеристик состояния дорожной сети

$$E = f(\text{УД}, \text{УС}, Z), \quad (5)$$

где  $E$  – результат реализации комплекса мероприятий, тыс. руб.;  $Z$  – затраты на реализацию мероприятий; УД – условия движения (результатирующая функция параметров транспортного потока: транспортных расходов, обеспеченной скорости и безопасности движения). УС – уровень содержания дороги (совокупность требований, определяющих необходимое состояние дорожных элементов).

Для успешного выполнения целевых показателей программы по всем трем направлениям архитектура информационной системы должна обеспечить взаимодействие участников программы «Управление дорожной сетью городской агломерации» для выработки согласованных и эффективных решений при реализации всех дорожных проектов.

Основными предпосылками для перехода к цифровой трансформации в системе управления транспортной инфраструктурой городской агломерации являются:

- рост требований потребителей к параметрам и доступности объектов капитального строительства;
- превышение запланированных сроков и стоимости строящихся объектов;
- недостаточный уровень квалификации специалистов отрасли по современным технологиям строительства;
- «лоскутная» автоматизация предприятий отрасли, высокая доля импортного программного обеспечения;
- недостаточная конкурентоспособность отечественных компаний на зарубежных рынках;
- высокий уровень потерь вследствие неэффективных процессов;

<sup>12</sup> Солодкий А.И. Методические подходы к сравнению вариантов развития автомобильной дороги при разработке обоснования инвестиций // Сб. трудов II Международной научной конференции «Производственная инфраструктура в стационарной и нестационарной экономике», 12–15 сентября 2003, СПб, 2003. С. 90–95.

- неоптимальная загрузка мощностей и кадровых ресурсов на предприятиях отрасли;
- отсутствие механизмов перехода отрасли на новые стандарты.

При проектировании системы «Дорожная сеть-6D BIM» на первом этапе предусмотрено решение следующих локальных задач:

- структурирование и объединение разрозненной информации;
- автоматическое формирование пакета конкурсной документации;
- анализ мест концентрации дорожно-транспортных происшествий;
- разработка системы реагирования на обращения жителей региона о состоянии автомобильных дорог (портал «Мобильный гражданин»);
- контроль гарантийных обязательств подрядчиков;
- осуществление безбумажного документооборота;
- реализации календарно-сетевого планирования стадий жизненного цикла проектов;
- организации системы контроля поручений «Светофор».

На рисунке 2 представлена общая архитектура системы проекта «Дорожная сеть-6D BIM», отражающая связь двух информационных процессов: наполнение системы знаниями и формирование коробочных решений с использованием банка знаний. Применение n-D моделирования базируется на трехмерных проекциях сооружений (3-D) с дополнением технологиями цифрового моделирования календарных сроков, ресурсов и финансирования объектов в жизненном цикле.

Модуль «Эксплуатация» связан с ремонтом и содержанием объектов дорожной сети и обеспечивает подготовку решений по следующим вопросам:

1. Эффективное расходование бюджетных средств на ремонт и содержание объектов сети.
2. Контроль хода эксплуатации объектов в режиме 24/7 по технологии «Умного города».
3. Формирование базы знаний процессов ремонта и содержания объектов сети на основе национальных стандартов с последующей актуализацией.
4. Обеспечение поддержки принятия решений при выявлении проблемных ситуаций.

5. Решение вопросов планирования и координирования дорожных проектов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Элементы разрабатываемой информационной системы «Дорожная сеть-6D BIM» были апробированы в ходе реализации проекта комплексного развития транспортной инфраструктуры Омской агломерации. Создание и развитие этой агломерации осуществляется в рамках национальной государственной программы «Безопасные и качественные дороги РФ»<sup>13</sup>. В состав Омской городской агломерации (ОГА) с ядром в г. Омске включено дополнительно 9 муниципальных районов в радиусе около 50 км. Численность населения ОГА, по состоянию на декабрь 2018 года, составляла – 1 млн 490 тыс. человек или 75% населения Омской области, в том числе:

город Омск – 1 млн 178,4 тыс. чел.;  
девять муниципальных районов – 311,7 тыс. чел.

Состояние дорожной сети и целевые показатели проекта приведены в таблице. Министерством промышленности, транспорта и инновационных технологий Омской области в период с 2017 по 2018 гг. с привлечением научных организаций составлена комплексная схема развития транспортной инфраструктуры и организации дорожного движения ОГА на период 2019–2041 гг. Определен прогнозный спрос пассажиропотоков для всех видов транспорта.

Полномасштабная реализация программы ремонта дорог Омской городской агломерации началась в 2016 г. с программы «Платон». Проанализированы возможности использования программных продуктов отечественного и зарубежного производства. В то же время технология BIM представляет собой прежде всего процесс, связанный с изменением способа взаимодействия участников программы на основе современных способов обработки информации. На уровне 6D BIM моделирования, в информацию об объектах дорожной сети вносятся данные обо всех отклонениях в ходе производства работ.

---

<sup>13</sup> Безопасные и качественные дороги. Приоритетный проект Министерства транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bkd.rosdornii.ru/about/> (дата обращения: 04.04.2019).

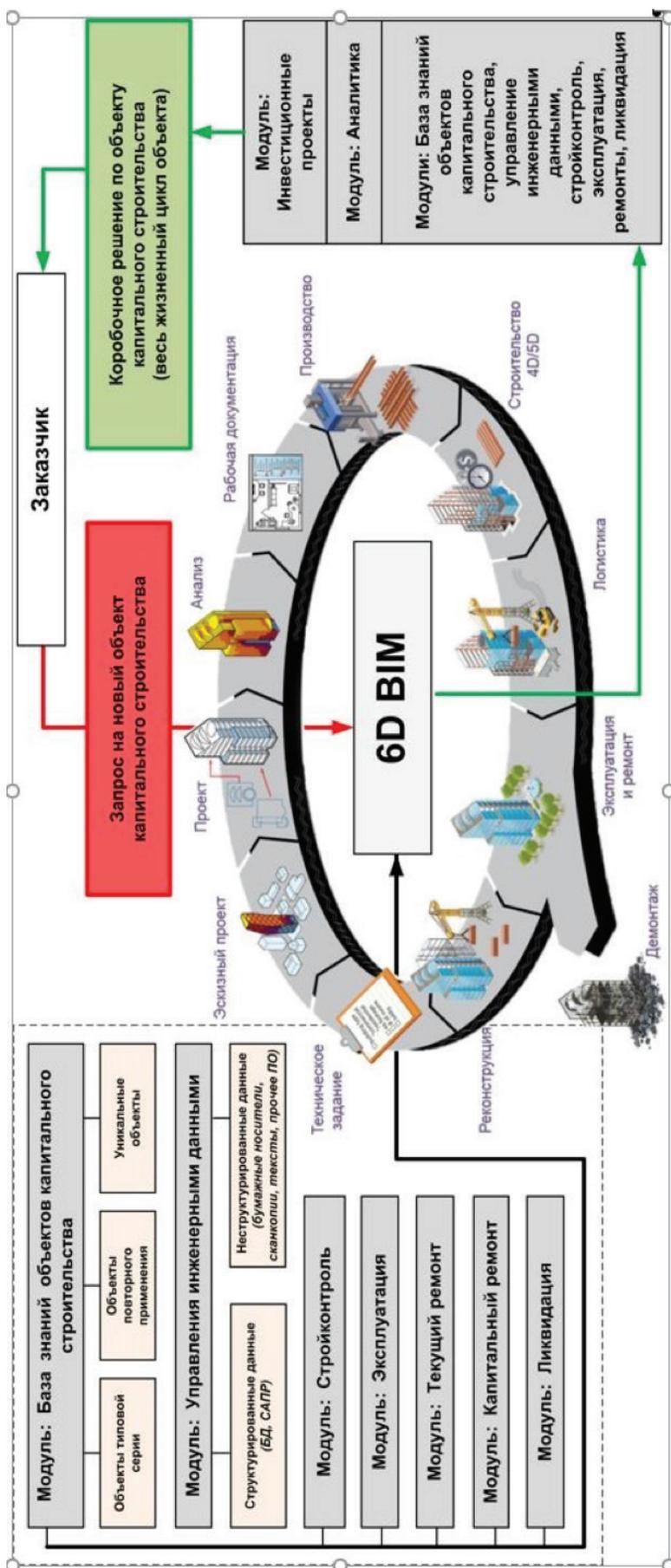


Рисунок 2 – Архитектура проектируемой системы «Дорожная сеть-6D BIM» Омской городской агломерации (схема разработана авторами)

Figure 2 – Architecture of the “Road network-6D BIM” designed system of the Omsk agglomeration (designed by the authors)

**Таблица**  
Протяженность и показатели состояния автомобильных дорог ОГА за период 2016–2019 гг.

Table  
Length and indicators of the roads' state of the Omsk agglomeration for the 2016-2019 period

Наименование показателя	Единица измерения	Базовое значение 2016 г.	Значение показателей по годам		
			2017	2018	2019 (проект)
Протяженность дорог общего пользования, всего	км	1257,2	1257,2	1257,2	1257,2
В т.ч.:	км				
федерального значения	км	198,0	198,0	198,0	198,0
регионального и межмуниципального значения	км	509,4	509,4	509,4	509,4
Улично-дорожная сеть	км	594,8	594,8	594,8	594,8
Доля дорожной сети, соответствующая нормативным требованиям	%	34	44	56	61
Количество мест концентрации ДТП	шт.	70	50	35	31
Доля протяженности автомобильных дорог, работающих в режиме перегрузки в час пик	%	11,5	11,3	11,1	10,9
Доля граждан, удовлетворенных состоянием дорожной сети и уровнем безопасности дорожного движения	%	-	20	40	50

Проектируемая информационная модель системы регионального проекта «Дорожная сеть-6D BIM» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» предназначена для обеспечения органов исполнительной власти, органов местного самоуправления, должностных и юридических лиц актуальными и достоверными сведениями о состоянии дорожной сети и ходе реализации регионального проекта. Повышение качества управленческих решений будет достигнуто за счёт формирования единого информационного пространства и применения информационных и телекоммуникационных технологий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществление проекта «Дорожная сеть - 6D BIM» в предлагаемой концепции позволит решить ряд проблем управления транспортной инфраструктурой городской агломерации:

- повысить вклад транспортной инфраструктуры в модернизацию национальной экономики за счет ускорения инвестиционных процессов;
- повысить конкурентоспособность дорожной отрасли за счет более эффективных проектных решений, улучшения потребительских свойств, эффективного использования машин, ресурсов и технологий в рамках всей производительной цепочки;

- использовать цифровые технологии для увеличения контроля качества выполнения работ;
- обеспечить оперативность и достоверность информации о выполнении проекта;
- уменьшить время отклика на запрос, увеличивая скорость принятия управленческого решения;
- использовать в строительстве роботизированные комплексы, повышая достоверность информации и уменьшить факторы субъективного характера.

Предполагается дальнейшее развитие системы с целью повышения интеллектуального уровня решаемых задач.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сирина Д.А. Подходы к исследованию структуры городских агломераций // Интернет-журнал «Науковедение» Том 9. №1 (2017). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/12TVN117.pdf>.
2. Островская О.Л., Миронов Д.Е. Проектный подход к решению проблем агломерационного развития субъектов Российской Федерации // Известия СПбГЭУ. 2014. №3 (87). С. 24–30.

3. Истомина Л.Ю., Баранов А.С. Методические особенности проектирования транспортных систем городских агломераций // *Архитектурный Петербург*. 2018. №3 (53). С.70–71.

4. L. Ustinovičius, A. Puzinas, J. Starynina, M. Vaišnoras, O. Černiavskaja, R. Kontrimovičius. Challenges of BIM technology application in project planning/ *Engineering Management in Production and Services*. V. 10, issue 2, 2018. P. 15-28. URL: <https://DOI.org/10.2478/emj-2018-0008>.

5. Premm, Kirn (2017): Autonomous Agents in Multiagent Organizations, Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2017), P. 121–128. URL: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006094901210128>.

6. Arayici Y., Coates P., Koskela L., Kagioglou M., Usher C., O'Reilly K. Technology adoption in the bim implementation for lean architectural practice// *Automation in Construction*. 2011. T.20. №2. P.189-195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016>// <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580510001457?via%3Dihub>.

7. Бекмагамбетов М.М., Кочетков А.В. Анализ современных программных средств транспортного моделирования // *Журнал Автомобильных Инженеров* №6 (77) 2012. С. 25–34.

8. Finogeev A., Finogeev A., Fionova L., Lyapin A., Lychagin K.A. Intelligent monitoring system for smart road environment. // *Journal of Industrial Information Integration*. 2019. T. 13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.003> // <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X18300542?via%3Dihub>.

9. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. Smartsite: intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects// *Automation in Construction*. 2016. T. 71. № Part 2. P. 21-33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.012> // <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516300528?via%3Dihub>.

10. Дмитриев И.И., Кириллов А.М. Умные дороги и Интеллектуальная транспортная система // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. №2 (53). С. 7–28.

11. Вожик К.А., Гарманов Е.Н. Системный подход к некоторым задачам экономики дорожного хозяйства // *Повышение экономической эффективности дорожного хозяйства в*

условиях рыночных отношений: Труды МАДИ. М., 2002. С. 5–11.

12. Красиков О.А. Мониторинг и стратегии ремонта автомобильных дорог. Алматы: КазгосИНТИ, 2004. 263 с.

13. Боброва Т.В. Проектно-ориентированное управление производством работ на региональной сети автомобильных дорог: монография. Омск. СибАДИ, 2006. 334 с.

## REFERENCES

1. Sirina D.A. Podhody k issledovaniyu struktury gorodskih aglomeracij [Approaches to research on the structure of urban agglomerations]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* Tom 9, №1 (2017). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/12TVN117.pdf>.

2. Ostrovskaya O.L., Mironov D.E. Proektnyj podhod k resheniyu problem aglomeracionnogo razvitiya sub"ektov Rossijskoj Federacii [Design approach to solving problems of agglomeration development of the constituent entities of the Russian Federation]. *Izvestiya SPbGEU*. 2014; 3 (87):. 24-30.

3. Istomina L.YU., Baranov A.S. Metodicheskie osobennosti proektirovaniya transportnyh sistem gorodskih aglomeracij [Methodological features of urban agglomeration transport systems design]. *Arhitekturnyj Peterburg*. 2018; 3 (53):70-71.

4. L. Ustinovičius, A. Puzinas, J. Starynina, M. Vaišnoras, O. Černiavskaja, R. Kontrimovičius. Challenges of BIM technology application in project planning/ *Engineering Management in Production and Services*. 2018; V. 10, issue 2: 15-28. URL: <https://DOI.org/10.2478/emj-2018-0008>.

5. Premm, Kirn (2017): Autonomous Agents in Multiagent Organizations, Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2017): 121-128. URL: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006094901210128>.

6. Arayici Y., Coates P., Koskela L., Kagioglou M., Usher C., O'Reilly K. Technology adoption in the bim implementation for lean architectural practice. *Automation in Construction*. 2011; T.20. №2: 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016>// URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580510001457?via%3Dihub>

7. Bekmagambetov M.M., Kochetkov A.V. Analiz sovremennyh programmyh sredstv transportnogo modelirovaniya [Analysis of modern

transport modeling software]. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. 2012; 6 (77): 25-34.

8. Finogeev A., Finogeev A., Fionova L., Lyarin A., Lychagin K.A. Intelligent monitoring system for smart road environment. *Journal of Industrial Information Integration*. 2019; 13. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X18300542?via%3Dihub>.

9. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. Smartsite: intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*. 2016; T. 71. № Part 2: 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516300528?via%3Dihub>.

10. Dmitriev I.I., Kirillov A.M., Umnye dorogi i intellektual'naya transportnaya sistema [Smart roads and intelligent transportation]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2017; (53): 7-28.

11. Vozhik K.A., Garmanov E.N. Sistemnyj podhod k nekotorym zadacham ekonomiki dorozhnogo hozyajstva [Systematic approach to some tasks of road economy]. *Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti dorozhnogo hozyajstva v usloviyah rynochnyh otnoshenij: Trudy MADI*. Moscow, 2002: 5-11.

12. Krasikov O.A. *Monitoring i strategii remonta avtomobil'nyh dorog*. [Road repair monitoring and strategies]. Almaty: KazgosINTI, 2004: 263.

13. Bobrova T.V. Proektno-orientirovannoe upravlenie proizvodstvom robot na regional'noj seti avtomobil'nyh dorog: Monografiya. [Project-oriented management of works on the regional road network: Monograph]. Omsk. SibADI, 2006: 334.

**Поступила 16.09.2019, принята к публикации 25.10.2019.**

**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**

Боброва Татьяна Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) ORCID 0000-0002-0292-4421, Researcher ID Y-3916-2018, Author

ID (SCOPUS) 57201362187 (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: bobrova.tv@gmail.com).

Андрюшенков Александр Александрович – магистр по направлению «Строительство», ООО «Агентство передовых исследований и разработок (АПИР)», эксперт (головной офис: Москва, пер. Б. Саввинский, 12, стр. 3, e-mail: andryushenkov\_aa@mail.ru).

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Tatyana V. Bobrova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics and Project Management in Transport Construction, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0002-0292-4421, Researcher ID Y-3916-2018, Author ID (SCOPUS) 57201362187 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: bobrova.tv@gmail.com).

Alexander A. Andryushenkov – Master, Agency of Advanced Research and Development, Expert in Remote Access Mode (Moscow, 12, building 3, B. Savvinsky St., e-mail: andryushenkov\_aa@mail.ru).

#### **ВКЛАД СОАВТОРОВ**

Боброва Т.В. Анализ моделей и методов управления агломерациями в России и за рубежом. Обоснование актуальности, формулирование цели и задач исследования. Обоснование принципов многоагентного проектного управления. Определение типов математических моделей для решения ключевых задач в рамках проектных модулей. Структурирование программы управления дорожной сетью агломерации.

Андрюшенков А.А. Разработка архитектуры системы «Дорожная сеть – 6D BIM». Анализ первого этапа экспериментальной проверки работоспособности моделей при решении локальных задач. Включение в структуру системы модуля «Эксплуатация», обеспечивающего оперативный контроль работ. Разработка портала «Мобильный гражданин» для реагирования на обращения жителей региона о состоянии автомобильных дорог.

#### **AUTHORS' CONTRIBUTION**

Tatyana V. Bobrova – analysis of management models and methods of urban agglomerations in Russia and abroad; rationale for the relevance, formulation of goals and objectives of the research;

*justification of the principles of multi-agent project management; identifying of mathematical models to address key challenges in the project modules; structuring of the program for managing the agglomeration road network.*

*Alexander A. Andryushenkov – development of the “Road network – 6D BIM” system architecture;*

*analysis of the first phase of experimental models’ testing for solving local problems; inclusion in system structure of the module “Operation, providing on-line control works”; development of the portal “Mobile citizen” to respond the complaints of residents about the roads’ state.*

УДК 693.557

## ОПЫТ НАУЧНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ «КАЧЕСТВО»

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев  
НИУ МГСУ, Москва, Россия  
ivan50@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с реализацией концепции «качество» при строительстве железобетонных объектов транспортного назначения, неразрывно связанной с применением научного сопровождения в период их проектирования и возведения. Исходя из того что в последние годы в нашей стране возводится большое количество транспортных объектов, спроектированных по индивидуальным проектам, а также основываясь на опыте научного сопровождения достаточно большого количества объектов транспортной инфраструктуры, можно с уверенностью сказать, что данная проблема является на сегодняшний день особенно актуальной в условиях внедрения современных строительных решений в сочетании с необходимостью получения требуемых свойств бетонных конструкций и обеспечения экономической целесообразности строительства. Целью настоящей работы является обобщение и систематизация основных методов и технологических приемов ведения бетонных работ, обеспечивающих минимизацию образования дефектов и трещин на строительной площадке при сооружении объектов транспортной инфраструктуры.

**Материалы и методы.** В настоящей статье на примере достаточного количества различных технологий, использованных при возведенных большого числа объектов в России в течение последних 10 лет и находящихся на стадии завершения строительства, показаны разработанные методы получения бетонных изделий высокого качества с учетом применения современных строительных материалов, которые многократно апробированы и доказали свою эффективность в реальном строительном секторе.

**Результаты.** Полученные результаты легли в основу проектов производства работ, технологических регламентов на производство работ, технических условий и стандартов организаций, руководств, а также позволили реализовать концепцию «качество» в транспортном строительстве, основанную на получении бездефектных железобетонных конструкций с заданными свойствами с учётом применения современных строительных материалов.

**Обсуждение и заключение.** Проведенные исследования позволили осуществить строительство внеклассных сложных транспортных сооружений различной массивности и протяженности и могут лечь в основу технологии возведения других объектов промышленного и гражданского строительства, в которых широкое применение получил железобетон. Статья будет интересна и полезна специалистам, занимающимся обеспечением бездефектного возведения железобетонных строительных конструкций, инженерно-техническим работникам, ведущим свою деятельность в условиях реального строительства, и посвящается памяти профессора, доктора технических наук А.Р. Соловьянчика (1938–2019).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железобетон, тепловыделение, температура, прочность, термонапряженное состояние, качество, научное сопровождение, транспортные объекты, ремонт.

© И.С. Пуляев, С.М. Пуляев



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

# OBJECTS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE: EXPERIENCE OF SCIENTIFIC SUPPORT IN CONSTRUCTION WITHIN THE “QUALITY” CONCEPT IMPLEMENTATION

*\*I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev*

*Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia  
\*ivanes50@mail.ru*

## ABSTRACT

**Introduction.** *The paper deals with the issues related to the implementation of the “quality” concept in the construction of reinforced concrete transport facilities linked with the scientific support during design and construction. Nowadays this problem particularly relevant in the context of the modern construction solutions, combined with the need to obtain the required properties of concrete structures and ensure the economic feasibility of construction. The aim of the research is to generalize and systematize the main methods and techniques of concrete works, which minimize the defects and cracks while the construction of transport infrastructure.*

**Materials and methods.** *On the example of different technologies used in the Russian construction over last 10 years, the authors demonstrated the developed methods of obtaining high quality concrete products taking into account tested and proved modern building materials.*

**Results.** *The results of the research formed the basis of the projects, technological regulations for the production, specifications and standards of organizations, guidelines. Moreover, the results also allowed implementing the concept of “quality” in transport construction based on obtaining defect-free reinforced concrete structures with specified properties, taking into account the use of modern building materials.*

**Discussion and conclusions.** *The research allows carrying out construction of various massiveness and extent. The obtained results form the basis of construction technology of other industrial and civil construction objects with reinforced concrete application. The paper is interesting and useful for specialists in providing defect-free construction of reinforced concrete building structures, for engineering and technical staff. The authors dedicate the research to the memory of Professor and Doctor of Technical Sciences, A.R. Solovyanchik (1938-2019).*

**KEYWORDS:** *reinforced concrete, heat release, temperature, strength, thermal stress state, quality, scientific support, transport facilities, repair.*

© I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev



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

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации возводится большое количество сооружений, спроектированных посредством индивидуальных проектов, которые сочетают в себе сложные геометрические размеры в плане с применением современных строительных материалов и систем. Наряду с указанными объектами достаточно массовый характер имеет строительство сооружений, спроектированных по типовым решениям, но исходя из условий рыночных отношений, с учётом все более жестких требований по обеспечению качества, надёжности и долговечности этих конструкций, к ним также предъявляются повышенные требования по обеспечению необходимых потребительских свойств. При этом колоссальное влияние на происходящие процессы оказывает зачастую то, что возведение этих объектов обусловлено стесненными условиями плотной городской застройки, ведение работ в сложной пересеченной местности, другие технологические и производственные факторы. Без применения современных актуальных решений достаточно сложно при условии соблюдения описанных выше условий обеспечить главный критерий, по которому оценивается степень готовности объекта и «зрелости» подрядной организации, качество и обеспечение требуемых потребительских свойств возводимых новых, реконструируемых и ремонтируемых действующих объектов потребовало современных подходов к разработке эффективных технологий возведения объектов, а также проведения ремонтных работ на базе использования современных материалов, удовлетворяющих запросам заказчиков и требованиям эксплуатации различных видов сооружений.

В советское время и период раннего становления капиталистического общества в нашей стране (в начале и середине 90-х годов прошлого века) многие транспортные сооружения, спроектированные по типовым проектам, возводились чаще всего с применением унифицированных технологических карт, а при использовании сборного железобетона вопросы обеспечения качества возводимых конструкций зачастую сводились к четкому соответствию требованиям действующей на тот момент нормативной документации (при её наличии) и утвержденным типовым технологическим картам на производство работ. Широкое же применение монолитного железобетона, постепенно заменившего собой сборный на рубеже веков и окончательно пришедший ему

на смену в наши дни (в части возведения объектов транспортной инфраструктуры), потребовало принятия зачастую новых технологических решений, связанных в первую очередь с воплощением различных архитектурных и конструктивных нововведений, но, как следствие, с учетом свойств бетона как строительного материала, который, как известно, имеет ряд специфических особенностей. Этот фактор потребовал привлечения к строительству различных научно-исследовательских объединений и институтов, призванных оперативно решать возникающие вопросы и проблемы с целью обеспечения требуемого качества, надёжности, долговечности конструкций, их экологичности и экономической целесообразности возведения.

В настоящей работе поставлена цель обобщить и систематизировать наиболее доступные, часто применяемые и несложные методы и приемы ведения бетонных и железобетонных работ, направленные на минимизацию образования дефектов и трещин, улучшение потребительских свойств объектов транспортной инфраструктуры, с достаточной легкостью реализуемые при проектировании и строительстве указанных сооружений.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследованиями установлено, что при возведении транспортных сооружений существует большая вероятность образования температурных трещин в период разогрева бетона ввиду разных скоростей набора температур маломассивных и массивных частей конструкции. А при остывании возможно возникновение продольных и косых трещин за счёт перепадов температур по сечению конструкций, а также вследствие снижения температур с разной скоростью в массивных и маломассивных частях конструкции. В связи с этим вопросом трещинообразования, нарушающего сплошность бетона и ведущего к ускоренной коррозии арматуры, следует уделять большое внимание. Поэтому при возведении крупногабаритных конструкций из монолитного бетона (тоннелей, мостов, путепроводов и прочих сооружений) в процессе проектирования в первую очередь видится целесообразным решение вопроса локализации влияния колебаний температуры на свойства бетона как в процессе твердения, так и в процессе эксплуатации объекта. Опыт возведения транспортных объектов показал, что для предупреждения трещинообразования руководствоваться исключительно нормами действующих нормативных

документов не всегда достаточно. Например, согласно действующим нормативным документам для обеспечения трещиностойкости в монолитных сооружениях необходимо на расстоянии не более 40 м устраивать постоянные температурно-осадочные деформационные швы. В то же время в нормативных документах и в проектной документации на строительство тоннелей, мостов, путепроводов и прочих сооружений не находят достаточного отражения вопросы, связанные с влиянием температурного режима твердеющего бетона на его трещиностойкость на стадии возведения конструкции, что зачастую приводит к появлению многочисленных трещин, на устранение которых затрачиваются значительные финансовые и людские средства. В каждом конкретном случае необходимо проведение дополнительных исследований, которые направлены на предотвращение трещинообразования, возникающего от воздействия температурного фактора и необходимых для составления обоснованных нормативных документов и проектов производства работ.

Наиболее полно требования по оптимизации и учёту температурного фактора обобщены для объектов гидротехнического строительства [1, 2], а также для условий сооружения цементно-бетонных покрытий дорог и аэродромов [3]. Применительно же к возведению тоннелей, мостов, путепроводов проблема впервые была решена представителями школы профессора А.Р. Соловьянчика [4, 5], которыми был создан целенаправленный пакет прикладных программ расчета температурных полей, термических напряжений и роста прочности бетона<sup>1, 2</sup>, давший возможность учитывать реальные теплофизические и термодинамические характеристики бетона и его состав, условия теплообмена с окружающей средой, виды применяемого опалубочного оборудования, а также многие иные ранее не учтенные моменты и разрабатывать принципы снижения вероятности трещинообразования на стадии возведения сооружений [6, 7]. Кроме того, в отличие от принципов расчета термонапряженного состояния в гидротехническом и дорожном строительстве был обоснован важный

показатель в оценке термонапряженного состояния транспортных сооружений, а именно было показано, что отправным моментом при определении степени влияния температуры на качество конструкции должен служить анализ температурного поля нулевых напряжений, формирующихся к моменту образования в твердеющем цементном камне пространственной кристаллизационной структуры из гидросиликатов кальция, за которое принимается время перехода бетона в упругое состояние, характеризующее прочностью на сжатие в пределах 25–30% от прочности в возрасте 28 суток [8, 9, 10].

Для выбора способа управления тепловым режимом бетона по проектным решениям конкретного сооружения выделяются конструктивные узлы, в которых возможны высокие концентраторы температурных напряжений, определяется конструкция опалубочных щитов для этих узлов, завод-поставщик цемента в регион строительства рассматриваемого объекта и учитывается состав бетонной смеси для обеспечения класса бетона, заложенного в проекте. Далее на основе проектной документации и полученной исходной информации по программному комплексу производится расчет изменения температур и роста прочности бетона с оценкой возникающих при этом температурных деформаций. На основе полученного расчетного материала делается вывод о необходимости применения конкретного способа управления температурным режимом бетона и, как следствие, качеством всего строительного процесса, а также определяются параметры этого способа [11, 12, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Первый важный проблемный вопрос, который был решен с помощью программ расчета температурных полей, был связан с необходимостью строительства в назначаемые сжатые сроки таких протяженных конструкций, как тоннели (в особенности рамповые участки на въездах и выездах) [14, 15, 16]. Конструктивно-технологический узел, в котором, как правило, возникает высокая вероятность образования температурных трещин, связан с

<sup>1</sup> Соловьянчик А.Р. [и др.]. Разработка новой методики исследования температурного режима, прочности твердеющего бетона и термонапряженного состояния конструкций транспортных сооружений с помощью персональных компьютеров. М.: ЦНИИС, 1992. 70 с.

<sup>2</sup> Соловьянчик А.Р. [и др.]. Разработка новой методики исследования температурного режима, прочности твердеющего бетона и термонапряженного состояния конструкций транспортных сооружений с помощью персональных компьютеров. М.: ЦНИИС, 1992. 70 с.

### РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

этапностью выполнения бетонных работ и относится к зоне сопряжения затвердевшего и вновь укладываемого бетона. В этой зоне в процессе твердения уложенного бетона образуется его «защемление» бетоном ранее возведенной части сооружения и оно препятствует проявлению свободных деформаций на стадии остывания конструкции. Стремление бетонировать тоннельные сооружения крупноразмерными захватками без разбивки на блоки бетонирования с целью сокращения сроков работ и уменьшения числа рабочих швов потребовало всесторонней оценки температурных режимов твердения бетона и указало на необходимость учета «защемления» бетонизируемых блоков в зоне контакта с ранее возведенными элементами конструкции, например при бетонировании стен после устройства днища. Было установлено, что для предупреждения появления температурных трещин размер блока бетонирования в этих случаях не должен превышать 15–17 м, если в момент замыкания шва разность температур между наиболее разогретой частью конструкции и температурой в зоне замыкания шва составляет не более 20 °С (рисунок 1).

Расчеты, выполненные посредством расчётного комплекса, позволили определить режимы дополнительного отогрева ранее забетонированных элементов, способствующих уменьшению разности температур между рассматриваемыми зонами конструкции и увеличению размеров блоков бетонирования до значения 20–21 м. Опыт реализации на практике режимов дополнительного отогрева ранее возведенных элементов показал, что для локального подвода тепловой энергии к бетону предпочтительнее использовать нагревательный провод, установка которого в зоне сопряжения стен с днищем позволяет бетонировать участки стен захватками длиной до 30 м.

Для ускорения строительства тоннельных сооружений также были разработаны условия их возведения блоками длиной 30 м с устройством между ними технологического (рабочего) шва шириной 1,5–2,0 м. При этом правильность расчетных предпосылок подтвердилась отсутствием трещин в построенных блоках днища и стен конструкций.

В ряде случаев (в силу проектных решений) возникает необходимость бетонировать за один прием участки тоннеля длиной более 40 м.

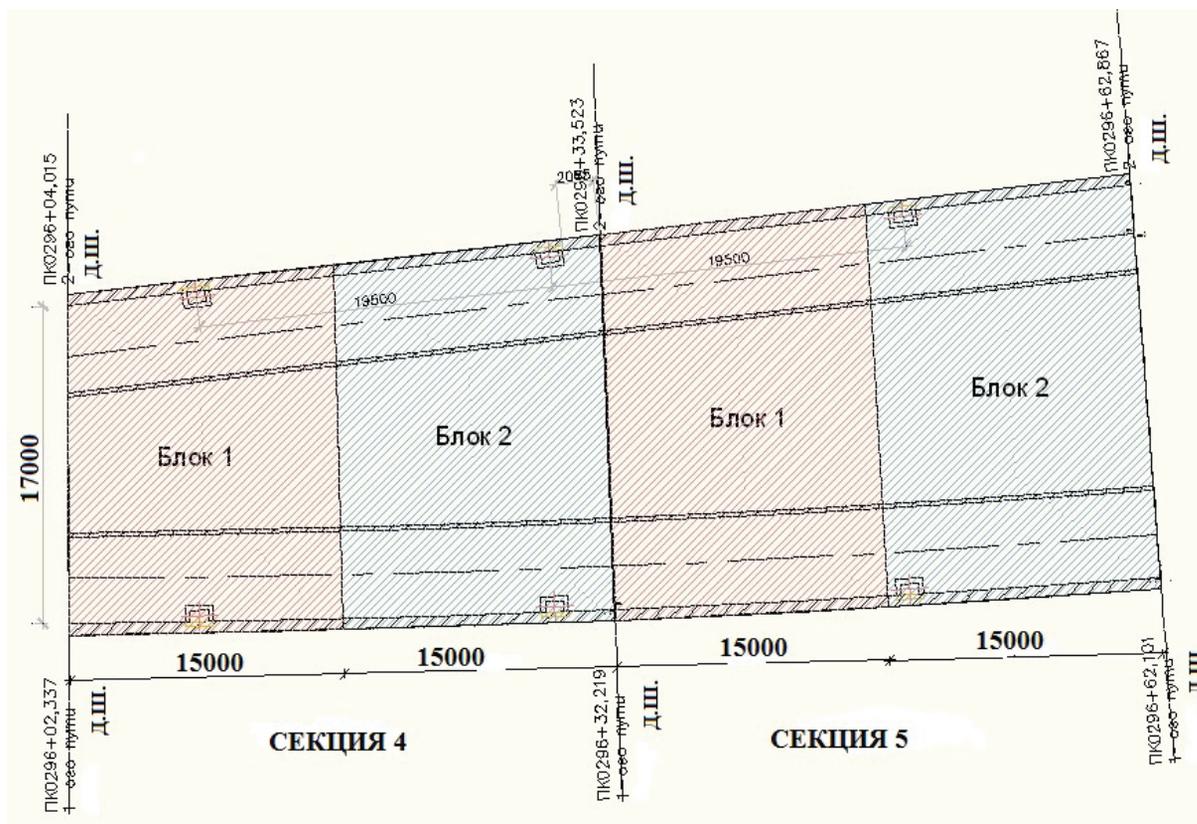


Рисунок 1 – Эскизная схема разбивки днища тоннеля на блоки бетонирования по длине

Figure 1 – Schematic diagram of the splitting of the tunnel bottom into the concrete blocks

На основании проведенных исследований был разработан ряд технологических приемов, включающий послойную укладку в опалубку сначала бетонной смеси с температурой 20–25 °С, а затем с температурой 6–10 °С. Такой способ бетонирования позволил снизить в два раза разность температур между максимально разогретым ядром и минимально разогретой окраиной конструкции, обеспечить высокую однородность температурного поля и в комплексе с неполным по отношению к проектному обжатию бетона успешно решить поставленную задачу. Для ускорения сроков устройства перекрытий разработана технология бетонирования блоков стен и перекрытий длиной до 38 м за один прием. Технологией предусматривается комплексный отогрев бетона свай до заданной температуры как перед укладкой бетона, так и при его выдерживании, в том числе с использованием специального приема, позволяющего направить тепло гидратации цемента в зону отогреваемых свай. Температурные поля в зоне сопряжения стен и перекрытия с основанием из свай при предложенном способе в сравнении с традиционным показывают на уменьшение величины температурных перепадов и в момент форми-

рования температурного поля нулевых напряжений, и в период максимального разогрева бетона, что позволяет возвести тоннель без трещин, а сроки строительства сократить в 1,5 раза за счет укрупнения бетонизируемых захваток, снижения трудоемкости работ и уменьшения количества технологических швов. Другим примером совершенствования технологии возведения конструктивных элементов тоннельных сооружений, апробированных на практике, можно считать технологию возведения днища (лотка) тоннеля одновременно с технологическими выступами («пеньками») стен на высоту 0,6–0,8 м (рисунок 2). Образование таких «пеньков» упрощает отогрев основания перед бетонированием стен в холодный период года, а также создает предпосылки для бетонирования стен тоннеля более длинными блоками.

При строительстве туннельно-эстакадных участков может использоваться еще один метод реализации усовершенствованной технологии, так называемый «миланский способ», при котором вначале возводится перекрытие тоннеля, а впоследствии днище и стены.

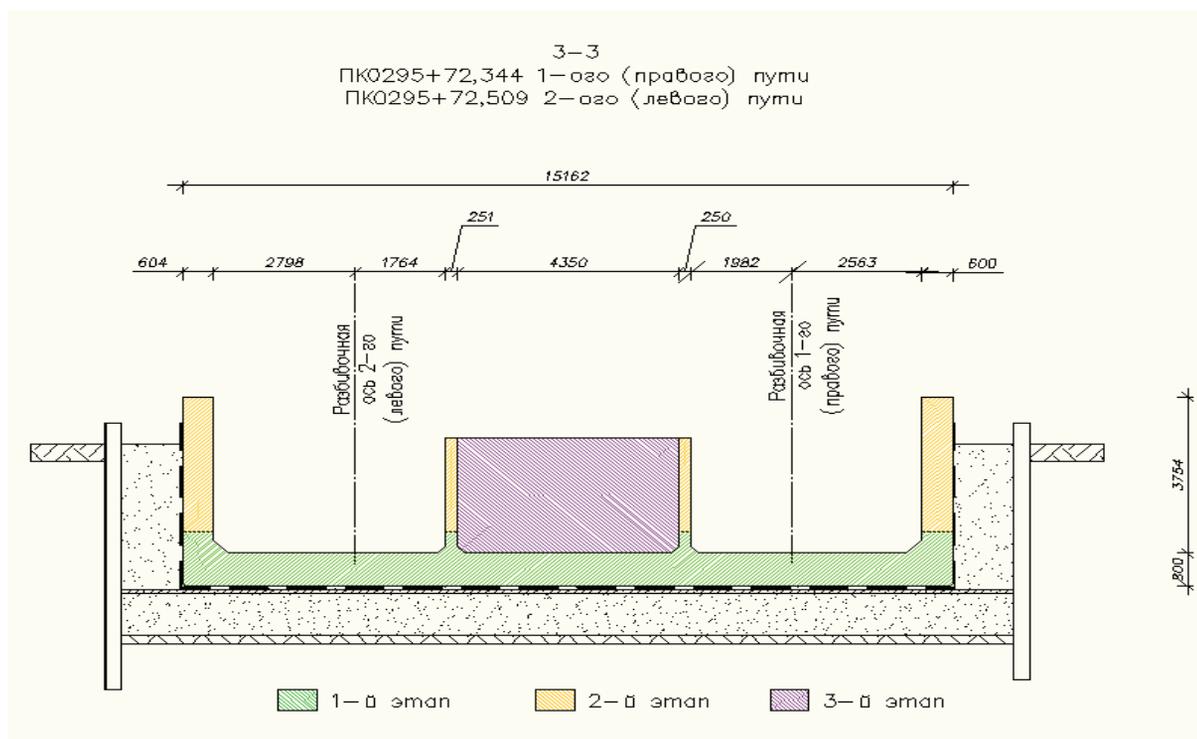


Рисунок 2 – Эскизная схема разбивки днища тоннеля на захватки бетонирования с технологическим выступом

Figure 2 – Schematic diagram of the splitting of the tunnel bottom into the concreting capture with technological protrusion

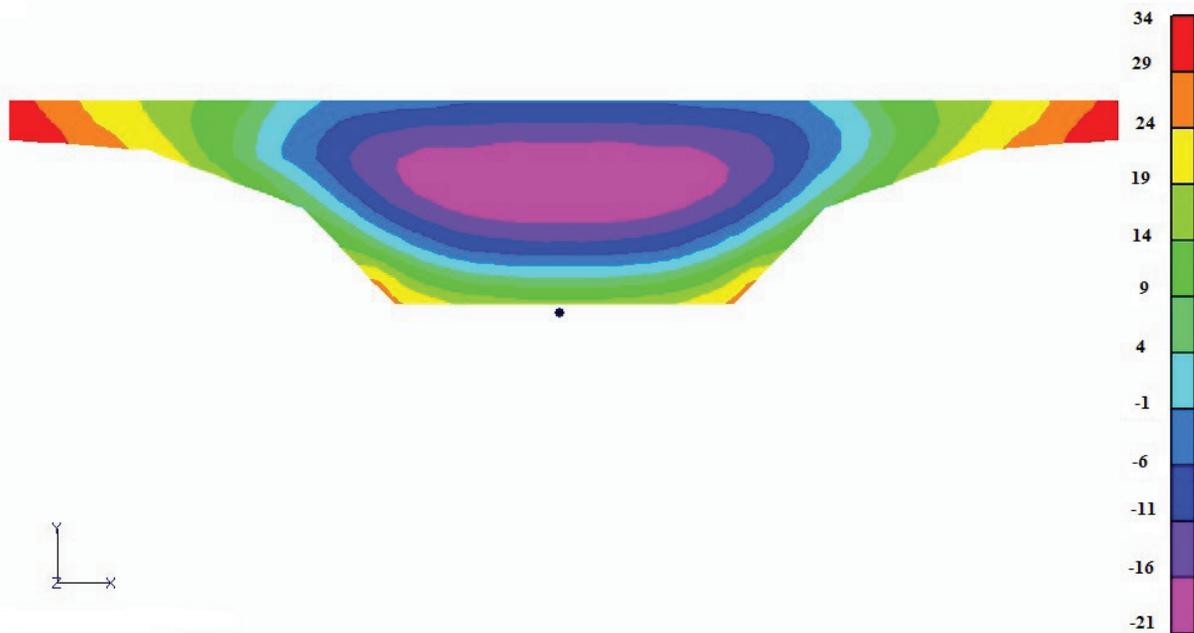


Рисунок 3 – Распределение температурных напряжений в пролетном строении без применения специальных мер по выравниванию температур в бетоне

Figure 3 – Distribution of temperature stresses in the structure without the use of special measures for equalizing the concrete's temperatures

Применение такого способа возведения особенно эффективно в условиях плотной городской застройки, так как наличие перекрытия помогает защитить близлежащие жилые и общественные постройки от шума и грязи при выполнении строительных работ. При возведении тоннельных сооружений «миланским способом» перекрытие опирается и «защемляется» в ограждение из буросекущих свай. При наличии такого «защемления» для локализации проявления температурных напряжений в случае ведения работ традиционными способами возникает необходимость бетонирования верхней части стен и перекрытия блоками длиной не более 15–16 м.

Второй вид сооружений, для которых потребовалось разработать условия, исключающие трещинообразование в конструкции, включает плитно-ребристые пролетные строения мостовых переходов и эстакад с массивными несущими ребрами, маломассивными консолями и центральной межреберной частью. Исследования в этом случае показали, что в массивном ребре уже на стадии разогрева бетона от экзотермии цемента могут возникать деформации, вызывающие появление температурных трещин (рисунок 3).

Причина этого заключается в том, что бетон в периферийных слоях, охлаждаясь за счет контакта с окружающей средой, деформирует-

ся относительно незначительно, в то время как бетон в ядре, разогреваясь до высоких температур, претерпевает более весомые температурные деформации, которые приводят в конечном итоге к разрыву наружных поверхностных слоев, не имеющих еще достаточной прочности на растяжение. Поэтому для разработки методов предупреждения появления температурных трещин на стадии разогрева необходимо детально анализировать величину температурных деформаций в различных сечениях конструкции и проектировать состав бетона с минимальным количеством цемента на кубометр бетонной смеси. Анализ развития температур в процессе выдерживания бетона в плитно-ребристых пролетных конструкциях показал, что за счет более интенсивного разогрева ребра темп твердения бетона в нем более высокий, чем в консоли и на определенной стадии выдерживания бетона консоль становится условно защемленной в ребро. Перепад температур при этом довольно существенен, и может привести к образованию поперечных трещин в консоли.



Рисунок 4 – Схема устройства дополнительной тепловой изоляции плиты пролётного строения в технологическом укрытии

Figure 4 – Scheme of additional thermal insulation of the structure plate in the technological shelter

Проведенный поиск вариантов выравнивания температур по сечению конструкций с разномассивными зонами показал, что наиболее эффективным способом предупреждения трещинообразования является укрытие консоли более мощной тепловой изоляцией и дополнительного утепления опалубки консоли снизу с устройством дополнительного укрытия в виде полога снизу, позволяющего перераспределять тепловую энергию между ребрами и консолью пролётного строения (рисунок 4).

Температурное поле при выполнении данного комплекса мероприятий оказалось в достаточной степени равномерным, что позволило впервые в практике мостостроения обеспечить бездефектное бетонирование за один прием пролётного строения длиной 179 м. Исследования также показали, что в условиях ведения работ в тёплый период года герметичное закрепление сверху маломассивных консолей светопрозрачных покрытий с заданным термическим сопротивлением вместо устройства дополнительной тепловой изоляции гарантирует не только сохранность тепла, но и дополнительный разогрев бетона консоли солнечным радиационным потоком, еще в большей степени снижающим вероятность образования температурных трещин [17, 18, 19, 20].

Известно, что монолитный бетон также широко применяется при возведении ростверков, устоев и опор мостов, и, несмотря на то, что в настоящее время в нашей стране накоплен большой опыт обеспечения высокого качества бетонных работ, периодически возникает ряд вопросов обеспечения потребительских свойств бетона, требующих грамотного решения [21, 22, 23, 24]. В частности, в последние годы возводится большое количество ростверков внушительных размеров, например при строительстве мостов через р. Москву, Оку, Крымского моста. Имеющийся опыт возведения подобных крупноразмерных железобетонных конструкций и теплофизические расчеты показывают, что для обеспечения необходимой трещиностойкости бетона и предупреждения появления температурных трещин, возникающих при разогреве бетона от экзотермии цемента и последующем его остывании, требуется разбивка массивных конструктивных элементов на захватки по высоте и на блоки бетонирования в плане, а также постановка дополнительной тепловой изоляции в местах наибольшего перепада температур по сечению конструкции (рисунок 5).

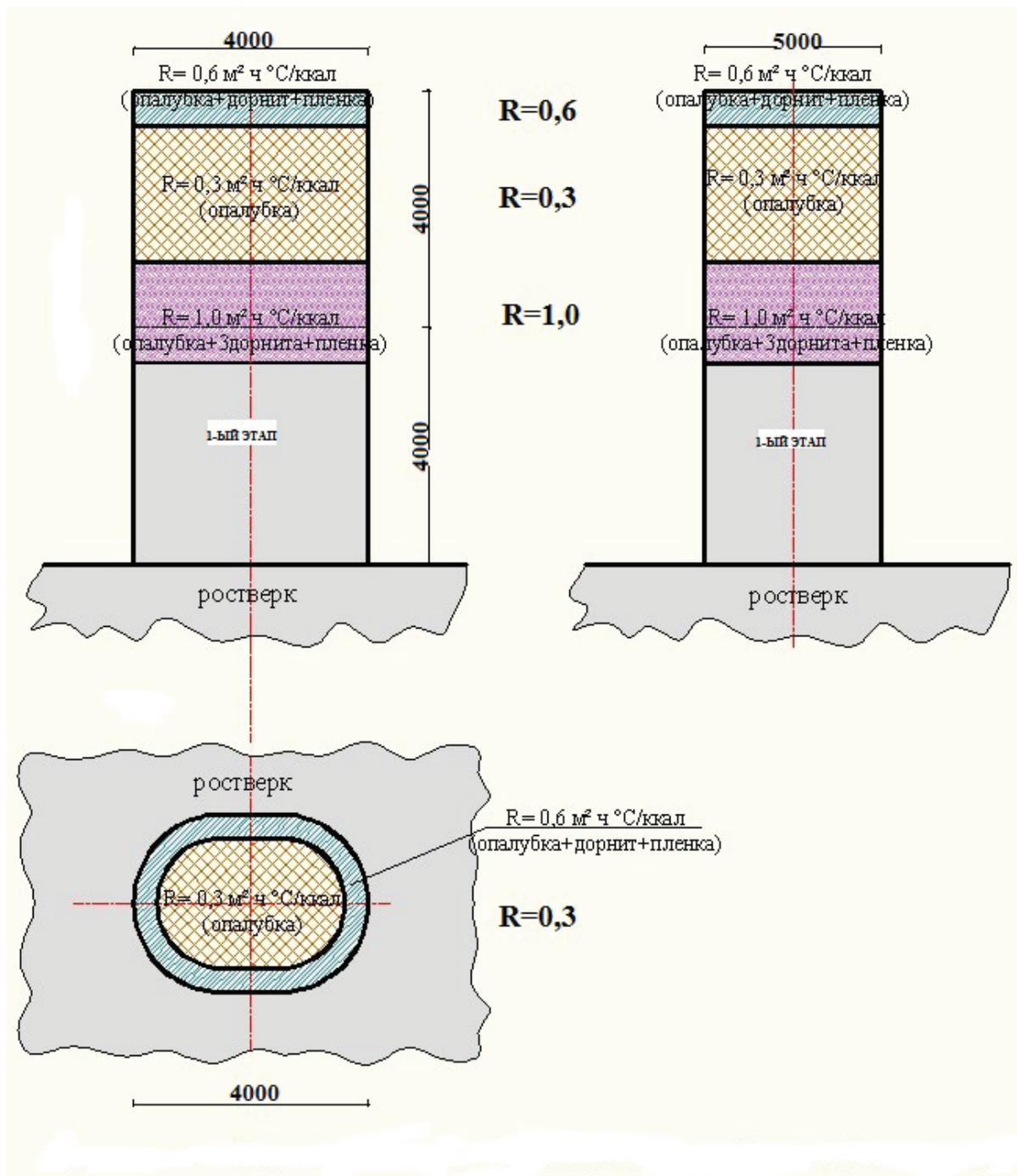


Рисунок 5 – Схема разбивки стойки опоры Крымского моста на блоки бетонирования и её укрытия дополнительной тепловой изоляцией

Figure 5 – Splitting scheme of the Crimean bridge support into the concreting blocks and of its shelter with additional thermal insulation

При выборе способов управления температурным режимом твердеющего бетона в случае возведения высоких (более 5 м) стоек опор за один прием в холодный период года следует отметить о необходимости устройства в тепляках отсекающих диафрагм с перепускными клапанами, позволяющих регулировать теплопоступления в верхние зоны стоек и предотвращать тем самым перегрев бетона.

Обеспечение требуемого качества возводимых новых, реконструируемых и ремонтируемых действующих объектов требует современных подходов к разработке эффективных технологий не только проектирования и строительства, но проведения ремонтных работ на базе использования современных материалов, удовлетворяющих требованиям эксплуатации различных видов транспортных сооружений. Ремонтные работы, как правило, выполняются как на стадии возведения объектов, так и при их эксплуатации. В период возведения конструкций обычно осуществляется устранение дефектов, допущенных во время строительства, и лечение различных трещин. В период эксплуатации проводятся различные виды ремонтов, в том числе связанные с восстановлением и увеличением несущей способности отдельных возводимых конструкций или всего сооружения в целом. Во всех случаях ремонт должен быть выполнен своевременно, качественно, обеспечивая требуемую долговечность и продолжительность межремонтных сроков конструкции. Качество работ по ремонту железобетонных конструкций зависит от правильной организации работ по проведению ремонта, обоснованного выбора ремонтных материалов и применения современных технологий, апробированных на практике. Все перечисленные вопросы должны находить отражение в разрабатываемых нормативно-технических документах на выполнение ремонтных работ, а наличие пробелов в правилах технического нормирования по проектированию и выполнению строительно-монтажных и ремонтных работ, к сожалению, часто приводит к тому, что на строительную площадку попадают материалы низкого качества, а ремонтные работы выполняются на невысоком уровне. С целью систематизации вопросов, связанных с необходимостью полного отражения требований к проведению

ремонтных работ на транспортных объектах, было разработано Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов<sup>3</sup>, выдержавшее несколько переизданий.

Главной задачей при выполнении ремонтных работ является правильный выбор ремонтного материала (на основании технико-экономического обоснования и с учетом требований, обеспечивающих заданные условия эксплуатации и продолжительность межремонтных сроков). Однако достаточно часто выбор материала определяется исключительно финансовыми возможностями заказчика, а также с учетом элементов риска, связанного с недостаточным знанием условий последующей эксплуатации объектов и фактических технических характеристик новых материалов. Для эффективного ремонта конструкций из бетона и железобетона и подбора необходимых материалов, обеспечивающих качество конструкции, необходимо иметь определенную концепцию и четко установленную последовательность выполнения работ, позволяющую обосновать правильность выбора материала, планируемого к использованию при ремонте конструкций. На практике обычно ремонт конструкций проводится с применением материалов, подобных исходному материалу ремонтируемой конструкции. При его выборе необходимо соблюдать данное правило и требования по совместимости материалов, вследствие того что одинаковые материалы по ряду признаков могут быть несовместимыми. Совместимость материалов подразумевает характер их поведения как в незатвердевшем, так и в затвердевшем состоянии. Она базируется на физических основах взаимодействия ремонтируемого и ремонтного материалов. Выбор материала – это процесс компромисса, основанного на достоверной информации, и материалы, о которых нет полной и точной информации, не должны допускаться в производство. При выборе ремонтных материалов требуется соблюдать четкие принципы совместимости свойств ремонтных и существующих материалов. При выборе ремонтного материала подлежат учету: степень ответственности конструкций; глубина поражения / разрушения; планируемые условия эксплуатации (в первую очередь температурный режим); влажность и

<sup>3</sup> Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов. М. : ЦНИИС, 2010. 182 с.

### РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

агрессивность среды эксплуатации, динамичные воздействия; эстетические требования; положение и доступность ремонтируемой конструкции; объем работ, подлежащих выполнению (рисунок 6).

На выбор материалов напрямую влияет вид проводимого ремонта; глубина разрушений; условия эксплуатации; а также тип ремонта: текущий ремонт конструкций, не требующий восстановления их несущей способности; ремонт конструкций с восстановлением их несущей способности; ремонт конструкций с увеличением их несущей способности по отношению к несущей способности, заложенной в первоначальном проекте сооружения. На выбор материала могут повлиять и многочисленные другие факторы, включая такие как продолжительность времени, необходимого для передачи эксплуатационной нагрузки на отремонтированную конструкцию, имеющееся в наличии рабочее время для проведения

работ, скорость набора прочности ремонтным материалом при твердении и другие факторы. При выборе материалов следует принимать во внимание, что находящиеся на рынке материалы очень часто изменяются по множеству причин, в том числе в связи с заменой исходных сырьевых материалов, экологических норм и внедрения новых передовых технологий. Как следствие, происходит изменение физико-технических свойств этих материалов. Для подтверждения возможности использования таких материалов рекомендуется производить независимые испытания ремонтных материалов, особенно в тех случаях, когда при ремонте отдаются приоритет надежности и долговечности конструкции.

Особого внимания заслуживает вопрос устранения трещин в бетонных и железобетонных конструкциях, которые подразделяют на активные и неактивные. Активные трещины изменяют ширину раскрытия под воздействием прилагаемой нагрузки и изменений температуры.



Рисунок 6 – Процесс подготовки опоры эстакады к производству ремонтных работ

Figure 6 – Process of preparing the overpass support to repair

Неактивные трещины не изменяют ширины раскрытия при внешних воздействиях. Кроме того, активные («дышащие») трещины могут превращаться в неактивные посредством соответствующего усиления конструкции, восстанавливающего её сплошность. Одним из эффективных вариантов ремонта активных трещин можно считать метод наполнения их мастиками или эластичными эпоксидными смолами, не подверженными разрывным нагрузочным усилиям при изменении их раскрытия. Для устранения активных трещин в мостовых и тоннельных конструкциях в последние годы нашли широкое применение эластичные эпоксидные смолы, внедрение которых оказалось наиболее целесообразным в условиях повышенной влажности и силу присутствия грунтовых вод. Неактивные трещины герметизируют путём инъектирования в них состава, склеивающегося с бетоном, но не способного предотвратить изменения раскрытия при внешних воздействиях. Для герметизации волосяных трещин используют хрупкие и эластичные защитные покрытия, создающие пленку на поверхности бетона. В последние годы для ремонтных работ все более широкое применение находят сухие бетонные смеси, не требующие дозирования компонентов на месте производства работ. Для упрочнения материалов, повышения их водонепроницаемости, сопротивляемости воздействию агрессивных сред и повышения морозостойкости бетона используют кольматирующие материалы. Такие материалы также рекомендуются при проведении инъекционных работ.

Подводя итог, следует отметить, что только при правильном комплексном подходе к назначению ремонта железобетонных конструктивных элементов транспортных сооружений и научно обоснованном выборе технологий и материалов для ремонта можно обеспечить высокое качество работ и существенно продлить жизнь ремонтируемых конструкций при достаточно обоснованных экономических затратах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные мероприятия, описанные в настоящей статье, были успешно реализованы при строительстве транспортных объектов в Москве, Санкт-Петербурге, Сочи и других крупных городах, в Подмосковье, Крыму (рисунок 7) и других регионах нашей страны, показали свою состоятельность и востребованность, позволили избежать массового образования

температурных трещин в возводимых конструкциях, сократить сроки строительства объектов при неукоснительном соблюдении стандартов качества строительных работ. Однако в настоящей статье перечислены далеко не все способы управления температурным режимом твердеющего бетона, которые были предложены представителями школы профессора А.Р. Соловьянчика с целью решения многочисленных проблем, возникающих в бетоне как материале.

Но в целом видно, что температурный фактор оказывает существенное влияние на качество бетонных работ и в настоящий момент существует реальная возможность уменьшить это влияние несколькими способами, среди которых:

- использование низкотермичных цемента для бетонирования массивных бетонных конструкций (однако в настоящее время этот вопрос трудно разрешим в связи с отсутствием массового производства таких цементов в Российской Федерации);

- обеспечение снижения расхода цемента на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси. Этот вопрос можно решить на основе массового использования химических добавок нового поколения на базе поликарбоксилатов и применения модифицированных бетонов. Исследования также показали, что использование таких добавок позволяет существенно снизить расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона при обеспечении требуемой высокой прочности, водонепроницаемости и морозостойкости. Применение химических добавок и получение на их основе все более распространенных в нашей стране самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет решить еще одну проблему, связанную с уплотнением бетона при возведении высоких опор, густоармированных конструкций различного типа, тонкостенных конструкций и прочих сооружений. Кроме того, в настоящее время имеется ряд материалов и смесей, которые успешно прошли испытания и используются при строительстве ряда объектов, но которые ждут своего признания в широком кругу строителей и более широкого применения на практике.

В заключение необходимо отметить, что рассмотренные примеры регулирования температурного режима твердеющего бетона далеко не в полной мере отражают те вопросы и проблемы, которые в настоящее время стоят перед строителями на строительной площадке и перед научными работниками в научных организациях, однако накопленный опыт и имеющиеся знания неукоснительно подводят



*Рисунок 7 – Крымский мост*

*Figure 7 – Crimean bridge*

к выводу о том, что грамотное и обоснованное применение научно-технического сопровождения ведения бетонных работ в купе с применением современных строительных материалов и систем позволяют в должной мере обеспечить требуемые стандарты качества при проведении бетонных работ на строительной площадке.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Фролов В.К. Регулирование температурного режима бетона при сооружении плотин. Л.-М.: Энергия, 1964. 168 с.
2. Фрид С.А., Левених Д.П. Температурные воздействия на гидротехнические сооружения в условиях севера. Л.: Стройиздат, 1978. 202 с.
3. Горицкий Л.И. Теория и расчет цементно-бетонных покрытий на температурные воздействия. М.: Транспорт, 1965. 284 с.
4. Петров-Денисов В.Г., Гордеева В.Н., Шифрин С.А., Ли А.И. Численное моделирование теплообмена при тепловой обработке изделий на электростендет // Научно-технический журнал «Бетон и железобетон». № 1. М.: 1992. С. 45–51.
5. Соловьянич А.Р., Шифрин С.А. Управление термонапряженным состоянием монолитных железобетонных конструкций при скоростном круглогодичном строительстве транспортных сооружений // Научные труды ОАО ЦНИИС, № 203. М.: ЦНИИС, 2000. С. 25–32.
6. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 1. М.: 2007. С. 21–26.
7. Пряхин Д.В. Исследование работы вантового пролётного строения моста методами физического моделирования // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». № 10. М.: 2009. С. 11–13.
8. Лукьянов В.С., Соловьянич А.Р. Физические основы прогнозирования собственно-

го термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций // Сборник научных трудов ЦНИИС, №73. М.: ЦНИИС, 1972. С. 36–42.

9. Соловьянчик А.Р., Смирнов Н.В., Ильин А.А. Определение модуля упругости бетона в раннем возрасте и особенности его учета при расчетах термонапряженного состояния конструкций // Научные труды ОАО ЦНИИС, № 225. М.: ЦНИИС, 2004. С. 27–32.

10. Шифрин С. А. Современная дифференциальная калориметрическая установка ЦНИИС для исследования тепловыделения модифицированных бетонов // Научно-технический журнал «Приборы», № 5. М.: 2007. С. 18–22.

11. Заседателев И.Б., Шифрин С.А., Ткачев А.В. Особенности термообработки тонкостенных изделий в гелиоформах // Научно-технический журнал «Бетон и железобетон». № 1. М.: 1986. С. 7–12.

12. 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.

13. 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.

14. 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». № 3–4. М.: 2002. С. 53–59.

15. Гинзбург А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». № 1. М.: 2014. С. 98–110.

16. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.Г. Реализация концепции «качество» при сооружении Гагаринского тоннеля в г. Москве // Научные труды ОАО ЦНИИС «Технологии и качество возводимых конструкций из монолитного бетона», № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 206–212.

17. Командровский А.Ф. Опыт сооружения пролётных строений из монолитного предна-

пряженного железобетона // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 3–4. М.: 2003. С. 24–29.

18. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 1. М.: 2015. С. 2–17.

19. Космин В.В., Мозалев С.В. Проблемы исследований, проектирования и строительства мостов больших пролётов // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 1. М.: 2014. С. 19–24.

20. 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.

21. 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 р. Москву // Научные труды ОАО ЦНИИС «Исследование транспортных сооружений», № 230. М.: ЦНИИС, 2006. С. 24–30.

22. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.А. Опыт использования неполного обжатия 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.

23. Балючик Э.А., Величко В.П., Черный К.Д. Изготовление блоков облицовки в зимний период строительства моста через р. Ангару // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». № 10. М.: 2012. С. 4–7.

24. Величко В.П., Черный К.Д. Учет напряженно-деформированного состояния в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». № 2. М.: 2013. С. 11–13.

## REFERENCES

1. Frolov V.K. *Regulirovanie temperaturnogo rezhima betona pri sooruzhenii plotin* [Regulation of the temperature regime of concrete in the construction of dams]. L. –M.: Energy, 1964: 168 p.

2. Frid S.A., Lövenich, D.P. *Temperaturnye vozdejstviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya v usloviyah severa* [Temperature effects on hydraulic structures in the North]. Leningrad: Stroyizdat, 1978. 202 p.

3. Goritskii L.I. *Teoriya i raschet cementno-betonnykh pokrytij na temperaturnye vozdeystviya* [Theory and design of cement concrete pavement to the temperature effect]. M.: Transport, 1965. 284 p.

4. Petrov-Denisov V.G., Gordeeva V. N., Shifrin S. A., Li A. I. Chislennoe modelirovanie teploobmena pri teplovoj obrabotke izdelij na elektrostende [Numerical simulation of heat transfer during heat treatment of products on the electric stand]. *Scientific and technical journal Beton i zhelezobeton*, no 1. M.: 1992. pp. 45-51.

5. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A. Upravlenie termonapryazhennym sostoyaniem monolitnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri skorostnom kruglogodichnom stroitel'stve transportnykh sooruzhenij [Management of thermally stressed state of monolithic reinforced concrete structures in high-speed year-round construction of transport facilities]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS*. 2000; 203: 25–32.

6. Tarasov A.M., Bobrov F.YU., Pryakhin D.V. Primeneniye fizicheskogo modelirovaniya pri stroitel'stve mostov i drugikh sooruzhenij [Application of physical modeling in the construction of bridges and other structures]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2007; 1: 21–26.

7. Pryakhin D.V. Issledovaniye raboty vantovogo prolitnogo stroyeniya mosta metodami fizicheskogo modelirovaniya [Investigation of the cable-stayed bridge structure using physical modeling methods]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal Transportnoye stroitel'stvo*. 2009; 10: 11–13.

8. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhonnogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Physical basis for predicting the intrinsic thermo-stress state of concrete and reinforced concrete structures]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 1972; 73: 36–42.

9. Solov'yanchik A.R., Smirnov N.V., Il'in A.A. Opredeleniye modulya uprugosti betona v rannem vozraste i osobennosti ego ucheta pri raschetah termonapryazhennogo sostoyaniya konstrukcij [Determination of the modulus of elasticity of concrete at an early age and features of its account in the calculations of the thermally stressed state of structures]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS*. 2004; 204: 27–32.

10. Shifrin S.A. Sovremennaya differentsial'naya kalorimetricheskaya ustanovka CNIIS dlya issledovaniya teplovydeleniya modifitsirovan-

nyh betonov [Modern differential calorimetric unit TsNIIS for the study of heat generation of modified concrete]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Pribory»*. 2007; 5: 18–22.

11. Zasedatelev I.B., Shifrin S.A., Tkachev A.V. Osobennosti termoobrabotki tonkostennykh izdelij v gelioformah. [Peculiarities of heat treatment of thin-walled products in helioform]. *Scientific and technical journal Beton i zhelezobeton*. 1986; 1: 7–12.

12. Pulyayev I.S., Dudayeva A.N. Issledovaniye temperaturnogo rezhima tverdeyushchego betona verkhnikh 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 bypass of the city of Murom]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS «Ispytaniya i raschoty konstruktsiy transportnykh sooruzheniy»*. 2009; 251: 45–52.

13. Sokolov S.B. Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukha v teplyakakh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristyykh prolitnykh 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.

14. Solov'yanchik A.R., Korotin V.N., Shifrin S.A., Veytsman S.G. Opyt snizheniya treshchinnobrazovaniya v betone ot temperaturnykh vozdeystviy pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya [Experience in reducing cracking in concrete from thermal effects during the construction of the Gagarinsky tunnel]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2002; 3–4: 53–59.

15. 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]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal Vestnik MGSU*. 2014; 1: 98–110.

16. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.G. Realizatsiya kontseptsii «kachestvo» pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya v g. Moskve [Realization of the concept of “quality” in the construction of the Gagarinsky tunnel in Moscow]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS*

*Tekhnologii i kachestvo vozvodimykh konstrukt-siy iz monolitnogo betona*. 2003; 217: 206–212.

17. Komandrovskiy A.F. Opyt sooruzheniya polyotnykh stroeniy iz monolitnogo prednapryazhennogo zhelezobetona [Experience in the construction of superstructures of monolithic prestressed concrete]. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2003; 3–4: 24–29.

18. Vasil'yev A.I., Veytsman S.G. Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya [Modern trends and problems of domestic bridge construction]. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2015; 1: 2–17.

19. 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]. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal Vestnik mostostroyeniya*. 2014;1: 19–24.

20. 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.

21. 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 OAO TSNIIS Issledovaniye transportnykh sooruzheniy*. 2006; 230: 24–30.

22. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.A. Opyt ispol'zovaniya nepolnogo obzhatiya betona dlya preduprezhdeniya poyavleniya 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 konstrukt-siy iz monolitnogo betona»*. 2003; 217: 200–205.

23. 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].

*Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Transportnoye stroitel'stvo»*. 2012; 10: 4–7.

24. 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]. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Transportnoye stroitel'stvo»*. 2013; 2: pp. 11–13.

**Поступила 27.05.2018, принята к публикации 25.10.2019.**

**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 (г. Москва, Россия) – 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, Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

Пуляев Сергей Михайлович (г. Москва, Россия) – 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, 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).

### РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

---

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Пуляев И.С. Постановка задачи, анализ результатов, оформление статьи.*

*Пуляев С.М. Обработка результатов, редактирование статьи.*

#### AUTHORS' CONTRIBUTION

*Ivan S. Pulyaev – statement of the problem; analysis of the results; article structuring.*

*Sergey M. Pulyaev – processing of the results; article editing.*

## 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](http://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](http://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](http://vestnik.sibadi.org).

**Результаты.** В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлено на сайте журнала [vestnik.sibadi.org](http://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](http://vestnik.sibadi.org).

### 9. Библиографический список (References)

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

**Аффилиация.** Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

**Технические требования к оформлению.**

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисуночные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;

- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

**Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация).** Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

**Рецензирование.** Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

**Редакционная подготовка.** Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректура статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

**Публикация.** Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.

#### **Контактная информация:**

e-mail: [vestnik\\_sibadi@sibadi.org](mailto: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>