

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 22 / No 1 / 2023

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Геодезия и разработка полезных ископаемых

- Михайлов В. И., Купrienko Н. О.**
Геодезическое измерение деформаций
несущих опор и конструкций здания
Комаровского рынка
при его эксплуатации. 5
- Kosarev N. S., Lechner J., Padve V. A., Umnov I. A.**
Results of Many Years' Measurements Conducted
at the Czech State Long Distances
Measuring Standard Košice
(Косарев Н. С., Лехнер И., Падве В. А.,
Умнов И. А.)
Результаты многолетних измерений
на линейном базисе Коштице) 13

Машиностроение и машиноведение

- Быков К. Ю., Качанов И. В., Ленкевич С. А.,
Власов В. В.**
Акустическая методика регистрации
начальной скорости деформирования
при высокоскоростной штамповке
стержневых изделий 20

CONTENTS

Geodesy and Mining

- Mikhailov V. I., Kuprienko N. O.**
Geodetic Measurement of Deformations
of Load-Bearing Supports and Structures
of the Komarovsky Market Building
during its Operation 5
- Kosarev N. S., Lechner J., Padve V. A., Umnov I. A.**
Results of Many Years' Measurements Conducted
at the Czech State Long Distances
Measuring Standard Košice 13

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Bykov K. Y., Kachanov I. V., Lenkevich S. A.,
Vlasov V. V.**
Acoustic Method for Recording
Initial Deformation Rate
at High-Speed Forging
of Rod Products 20

Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Нисс В. С., Будницкий А. С.	
Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах	27

Строительство

Zhang Qing, Romaniuk V. N., Khroustalev B. M., Hou Qiang, Hou Dehua	
Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure (Чжан Цин, Романюк В. Н., Хрусталеv Б. М., Хоу Цян, Хоу Дэхуа Термодинамическая оценка свойств и энергозатрат смешения асфальтобетона по структуре эксергии)	34
AL-obaidi A. M. Sh., Leonovich S. N.	
Comparative Study of Fiber Glass Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer on Cube and Cylinder (Аль-Обайди А. М. Ш., Леонович С. Н. Сравнительное исследование полимера, армированного стекловолокном, и полимера, армированного углеродным волокном, на кубе и цилиндре)	42

Транспорт

Чикишев Е. М., Капский Д. В., Семченков С. С.	
Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды	48
Сернов С. П., Балохонов Д. В., Коничева Л. М.	
Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств. Часть 1. Стандартизация и основные применяемые конструкции головного освещения	60

Экономика промышленности

Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Прокопов С. В.	
Теоретико-методическое обоснование оценки и развития логистической инфраструктуры	69
Солодовников С. Ю., Сергиевич Т. В.	
Организационно-экономические механизмы модернизации реального сектора: на примере легкой промышленности	79

Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Budnitskiy A. S.	
Structure and Properties of Black Ceramic MAO Coatings on Aluminum Alloys	27

Civil and Industrial Engineering

Zhang Qing, Romaniuk V. N., Khroustalev B. M., Hou Qiang, Hou Dehua	
Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure	34
AL-obaidi A. M. Sh., Leonovich S. N.	
Comparative Study of Fiber Glass Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer on Cube and Cylinder	42

Transport

Chikishev E. M., Kapskiy D. V., Semchenkov S. S.	
Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment	48
Sernov S. P., Balokhonov D. V., Konicheva L. M.	
Current State and Prospects for Development of Head Lighting for Vehicles. Part 1. Standardization and Generally Used Vehicle Headlamp Designs	60

Economy in Industry

Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Prokopov S. V.	
Theoretical and Methodological Substantiation of the Assessment and Development of Logistics Infrastructure	69
Solodovnikov S. Y., Serhiyevich T. V.	
Organizational and Economic Mechanisms for Modernization of Real Sector: on the Example of Light Industry	79

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.01.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 9,68. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Leading Style Editor

V. N. Guryanichyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-5-12>

УДК 511.2:528.9

Геодезическое измерение деформаций несущих опор и конструкций здания Комаровского рынка при его эксплуатации

Канд. геогр. наук, доц. В. И. Михайлов¹⁾, инж. Н. О. Купrienko¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Комаровский рынок – самый большой крытый рынок в Беларуси и Европе. Работать он начал в 1980 г. До 2000 г. эксплуатация здания рынка велась без учета уникальности и повышенных требований для объектов такого типа. Технические условия и правила эксплуатации сборно-монолитной железобетонной оболочки покрытия размерами 103×103 м не выполнены. Это привело к тому, что отдельные элементы находились в предаварийном состоянии. Учеными и специалистами БГПА (БНТУ) проведены работы по обследованию технического состояния и эксплуатационной пригодности здания Комаровского рынка. Рекомендовано не реже одного раза в квартал выполнять геодезический контроль прогибов оболочки покрытия, деформаций бортовых элементов и опор. Для этого создали геодезическое плановое и высотное обоснование по периметру здания рынка и на его антресолях, с которых измерялись деформации оболочки покрытия и бортовых элементов. Поэтому высотное положение антресольей проверяли нивелированием IV класса. Для математической обработки результатов высокоточных геодезических наблюдений на языке Visual Basic редактора Excel составлен комплекс «Геодезические программы», который размещен на сайте БНТУ и в локальной сети университета. В течение 21 года программный комплекс использовался авторами не только для решения научно-производственных задач, но и в учебном процессе. Целесообразно внедрение программ в других учебных заведениях и на производственных предприятиях Республики Беларусь для решения задач инженерной геодезии. Измерения осадок свайных фундаментов здания рынка проводили геометрическим нивелированием II класса прибором KoNi 007. Определение прогибов оболочки покрытия выполняли тригонометрическим нивелированием теодолитом 2Т2 и электронным тахеометром Leica TCR 1201 по специальной методике. Точность порядка 1–2 мм обеспечивалась короткими лучами визирования. Смещения бортовых элементов измеряли теодолитом и электронным тахеометром полярным способом и круговым приемом. За время геодезического контроля измеренные величины прогибов оболочки покрытия, деформаций бортовых элементов и свайных опор не превышали установленных допусков, что свидетельствует о стабильности всех несущих конструкций здания Комаровского рынка.

Ключевые слова: деформация сооружения, нивелир, теодолит, электронный тахеометр, геодезические программы для ПЭВМ

Для цитирования: Михайлов, В. И. Геодезическое измерение деформаций несущих опор и конструкций здания Комаровского рынка при его эксплуатации / В. И. Михайлов, Н. О. Купrienko // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 5–12. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-5-12>

Geodetic Measurement of Deformations of Load-Bearing Supports and Structures of the Komarovsky Market Building during its Operation

V. I. Mikhailov¹⁾, N. O. Kuprienko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Komarovsky market is the largest covered market in Belarus and Europe. It started working in 1980. Until 2000, the operation of the market building was carried out without taking into account the uniqueness and increased

Адрес для переписки

Михайлов Владимир Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/1,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-85-17
inggeod@bntu.by

Address for correspondence

Mikhailov Vladimir I.
Belarusian National Technical University
25/1, F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-85-17
inggeod@bntu.by

requirements for objects of such type. The technical conditions and operating rules for the precast-monolithic reinforced concrete pavement shell with dimensions of 103×103 m have not been met. This led to the fact that individual elements were in a pre-emergency state. Scientists and specialists of the Belarussian State Polytechnical Academy carried out work on the examination of the technical condition and operational suitability of the Komarovsky market building. It is recommended to carry out geodetic control of coating shell deflections, deformations of side elements and supports at least once a quarter. To do this, a geodetic planned and high-altitude justification was created along the perimeter of the market building and on its mezzanines, from which deformations of the coating shell and side elements were measured. Therefore, the height position of the mezzanines was checked by the class-IV leveling. For mathematical processing of the results of high-precision geodetic observations in the Visual Basic language of the Excel editor, a complex "Geodetic Programs" was compiled, which is located on the Belarussian National Technical University website and in the local network of the University. For 21 years, the software package has been used by the authors not only to solve scientific and production problems, but also in the educational process. It is advisable to introduce programs in other educational institutions and industrial enterprises of the Republic of Belarus to solve the problems of engineering geodesy. The settlement measurements of the pile foundations of the market building were carried out by the class-II geometric leveling using KoNi 007 instrument. The coating shell deflections were determined by trigonometric leveling with a 2T2 theodolite and a Leica TCR 1201 electronic tacheometer according special technique. An accuracy of the order of 1–2 mm was ensured by short sighting beams. The displacements of the onboard elements were measured with a theodolite and electronic tacheometer using the polar method and circular technique. During the geodetic control, the measured values of deflections of the coating shell, deformations of the side elements and pile supports did not exceed the established tolerances, which indicates the stability of all load-bearing structures of the Komarovsky market building.

Keywords: structure deformation, level, theodolite, electronic tacheometer, geodetic software for PC

For citation: Mikhailov V. I., Kuprienko N. O. (2023) Geodetic Measurement of Deformations of Load-Bearing Supports and Structures of the Komarovsky Market Building during its Operation. *Science and Technique*. 22 (1), 5–12. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-5-12> (in Russian)

Введение

Комаровский рынок, самый большой крытый рынок в Беларуси и Европе, спроектирован группой архитекторов под руководством профессора Н. С. Аладова [1] (рис. 1). Он считается памятником архитектуры и градостроительства. Сооружение такого рода – уникальное произведение архитектуры, возведенное на месте болота. Купол сделан из сборных легких бетонных панелей, которые крепятся особым образом. 37 канатов диаметром 40 мм стягивают по периметру края оболочки покрытия. В каждом канате 124 проволоки из высокопрочной стали. Разрывное усилие каната 300 т. Таким образом, канаты и держат весь купол. В верхней точке купол поднят над полом здания рынка на 26 м – это почти высота 10-этажного дома. Для эксплуатации рынок открыт в 1980 г.

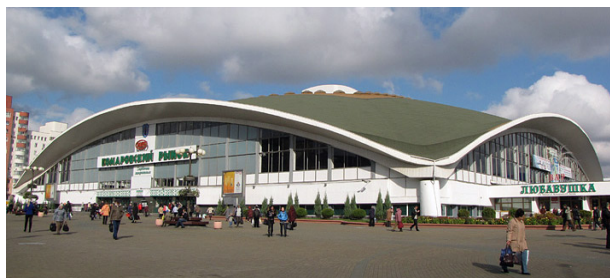


Рис. 1. Минский Комаровский рынок

Fig. 1. Minsk Komarovsky market

При обследовании технического состояния рынка в 2000 г. учеными и специалистами БГПА (БНТУ) выполнено измерение от пола до верхней точки купола. Оказалось, что она отклоняется от проектных данных на 10 см, т. е. равна 25,90 м. По-видимому, отклонение было допущено при монтаже оболочки покрытия или купол прогнулся под тяжестью многотонных металлических конструкций рекламных щитов, которые сейчас сняты.

До 2000 г. эксплуатация здания рынка велась без учета уникальности и повышенных требований для объекта такого типа. Технические условия и правила эксплуатации сборно-монолитной железобетонной оболочки покрытия размерами 103×103 м не выполнены. Это привело к тому, что отдельные элементы и участки оболочки покрытия находились в предаварийном состоянии.

Учеными и специалистами БГПА (БНТУ) проведены работы по исследованию технического состояния и эксплуатационной пригодности здания Комаровского рынка. Для дальнейшей безопасной работы обследуемого объекта рекомендовано не реже одного раза в квартал выполнять геодезический контроль прогибов оболочки покрытия, деформаций бортовых элементов и опор. Эти рекомендации согласуются с «Техническими условиями и правилами эксплуатации», разработанными в проекте строительства оболочки покрытия рынка.

Создание планового и высотного обоснования

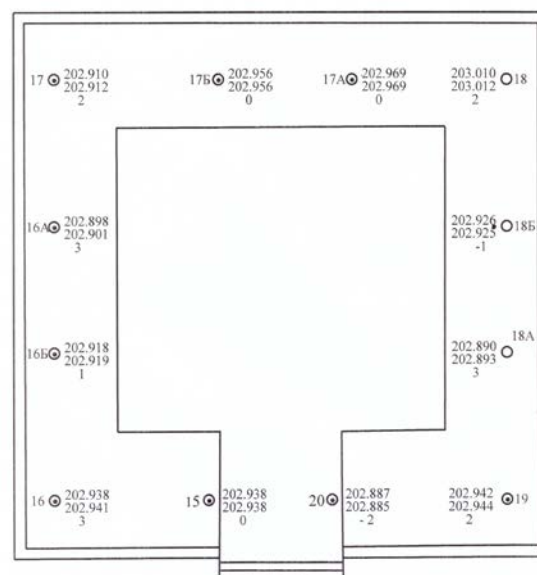
С этой целью по периметру рынка и внутри него создано оптимальное количество опорных геодезических пунктов на основе теодолитно-нивелирных ходов повышенной точности в системе координат г. Минска, которые закреплены монтажными дюбелями в твердом покрытии. В качестве исходных использовали пункты полигонометрии, заложенные в цокольной части дома № 5 по ул. В. Хоружей. Измерения горизонтальных углов осуществляли теодолитом 2Т2, длины линий – 50-метровой стальной лентой, отметки теодолитных точек – нивелиром KoNi 007.

В ходе геодезического контроля стабильности фундаментов и опор обследуемого здания проводили нивелирование IV класса опорных пунктов на антресолях рынка. Они использовались для проверки ее положения в высотном отношении и измерении прогибов оболочки покрытия и смещении бортовых элементов рынка. Для сравнения результаты нивелирования наносили на схемы. Так, на рис. 2 показаны отметки точек (м), определенные в июне и сентябре 2011 г., и их разности за этот период. Как следует из рисунка, деформации поверхности антресоли не превысили 3 мм, что свидетельствует о ее пригодности для геодезических измерений.

Для обработки результатов высокоточных наблюдений за деформациями здания рынка на языке Visual Basic редактора Excel составлены прикладные программы [2]. Они написаны открытым кодом, что позволяет вносить изменения и дополнения в построенный алгоритм. Ячейки с формулами защищены от случайного изменения и удаления. В течение 21 года программный комплекс активно использовался авторами не только для решения различных научно-производственных задач, но и в учебном процессе.

Целесообразно внедрение программ в других учебных заведениях Республики Беларусь. Они могут быть также применены на производственных предприятиях при решении задач инженерной геодезии. С этой целью программный комплекс «Геодезические программы»

размещен на сайте и в локальной сети БНТУ. Приведенные примеры на каждую из задач обеспечивают процесс освоения программ.



202.938 – отметки точек (м), определенные в июне 2011 г.;
16 ⊙ 202.941 – отметки точек (м), определенные в сентябре 2011 г.;
3 (мм) – разности отметок за период с июня по сентябрь 2011 г.

Рис. 2. Результаты нивелирования опорных точек на антресолях рынка, используемых для наблюдений за прогибами оболочки покрытия (все отметки определены от стенного репера № 283)

Fig. 2. Results of reference points leveling on the mezzanines of the market used for observations behind the deflections of the coating shell (all marks are determined from wall benchmark No 283)

Измерение осадок свайных фундаментов здания рынка

Для большинства стандартных и типовых сооружений точность определения осадок фундаментов обеспечивается геометрическим нивелированием II класса [3]. Закладку осадочных марок осуществляли в соответствии с СНБ 1.02.01–96 [4]. Всего по периметру здания рынка заложены 22 марки в виде монтажных дюбелей (рис. 3).

При геодезических наблюдениях за деформациями свайных фундаментов объекта использовали нивелир KoNi 007. Ежегодно прибор подвергали проверке в РУП «Белгеодезия» на предмет годности к применению с выдачей соответствующего свидетельства.

Высокоточный нивелир KoNi 007 перископической формы имеет оптико-механический компенсатор, автоматически устанавливающий

визирную ось горизонтально (рис. 4). Предназначен для нивелирования II и III классов.

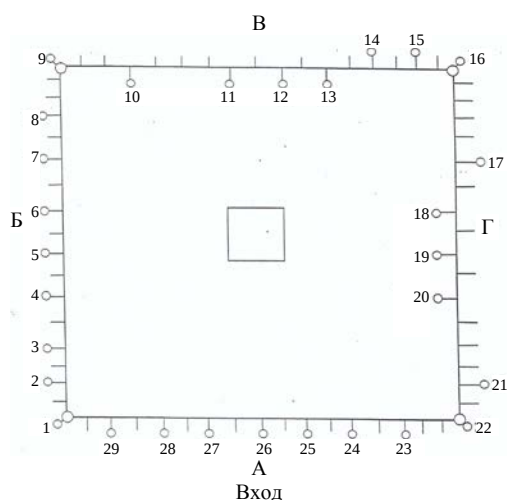


Рис. 3. Схема расположения осадочных марок на свайных фундаментах по периметру здания рынка:

— Q_4 — осадочная марка и ее порядковый номер

Fig. 3. Scheme of the location of sedimentary marks on pile foundations along the perimeter of the market building:

— Q_4 — sedimentary mark and its serial number



Рис. 4. Нивелир KoNi 007

Fig. 4. Level KoNi 007

Использование нивелира KoNi 007 в производственных цехах и закрытых помещениях имеет ряд преимуществ. По сравнению с цифровыми нивелирами он более устойчив, менее подвержен влиянию вибрации работающих механизмов. Обладая отличной немецкой оптикой, нивелир позволяет брать отсчеты по инварной рейке в затемненных и задымленных прост-

ранствах в радиусе 50 м. Как показало сравнительное нивелирование одного и того же цеха KoNi 007 и цифровым нивелиром DNA 03, время, затраченное на выполнение геодезических измерений, практически одинаковое [5].

При геометрическом нивелировании II класса применяли односторонние специальные рейки длиной 1,8 м, на лицевой стороне которых смонтирована инварная лента. На ленте имеют-

ся две шкалы с ценой деления 5 мм, которые смещены относительно друг друга на 2,5 мм. Рейки снабжены круглыми уровнями.

С целью периодических измерений деформаций осадочных марок разработали порядок геодезических наблюдений каждого объекта в виде замкнутых ходов при одном горизонте в прямом и обратном направлениях. Последующее нивелирование выполняли по одной и той же схеме. В висячем ходе допускалось не более двух станций. Высота визирного луча над поверхностью земли или фундамента была не менее 0,5 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек допускалось не более одного метра. Длина визирного луча не превышала 30 м.

После окончания геодезических измерений превышения вычисляли по известной формуле

$$h = a - b, \quad (1)$$

где a , b — отсчет по задней и передней рейкам соответственно.

Предельное расхождение между вычисленными превышениями по основной и дополнительной шкалам на превышало 4–5 делений барабана. Для получения превышения в миллиметрах необходимо его среднюю величину разделить на 20. Допустимую невязку в замкнутом полигоне подсчитывали по формуле

$$f = l\sqrt{n}, \quad (2)$$

где n — число станций.

Высоты промежуточных точек определяли через превышение между задней связующей точкой и промежуточной. Если вычисленная невязка находилась в допуске, она распределялась в виде поправок с обратным знаком пропорционально числу средних вычисленных превышений.

В табл. 1 приведена ведомость отметок и деформаций осадочных марок свайных фундаментов здания рынка за период с августа 1999 г. по июнь 2000 г. Как следует из таблицы, большинство вычисленных осадок колеблются в пределах одного миллиметра. Это свидетельствует об отсутствии каких-либо деформаций фундамента этого объекта за рассматриваемый период времени.

Таблица 1

**Ведомость отметок и деформаций осадочных марок
свайного фундамента здания рынка
с августа 1999 г. по июнь 2000 г.**

**List of marks and deformations of sedimentary marks
of pile foundation of the market building
from August 1999 to June 2000**

Номер марки	Отметка, мм		Деформация, мм
Репер 823	200503,0	200503,0	
1	908,9	200908,2	−0,7
2	786,9	787,1	0,1
3	786,2	786,2	0,0
4	730,2	730,8	0,6
5	839,0	840,1	1,1
6	713,5	714,3	0,8
7	721,4	720,8	−0,6
8	700,0	700,5	0,5
10	590,2	590,8	0,6
11	570,6	570,7	0,1
12	586,6	587,5	0,9
13	507,5	508,2	0,7
14	997,8	998,0	0,2
15	955,5	955,7	0,2
16	939,7	939,9	0,2
18	610,1	610,1	0
19	510,1	510,1	0
20	871,2	872,6	1,4
21	201019,5	201020,5	1,0
22	057,2	056,9	−0,3
23	200932,3	200931,4	−0,9
26	201872,7	201871,3	−1,4
27	852,1	852,7	0,6
28	200921,0	200920,5	−0,5
29	946,6	945,7	−0,9

Определение прогибов оболочки покрытия здания рынка

Способ тригонометрического нивелирования позволяет определять осадки точек, расположенных на разных высотах и в труднодоступных местах. Точность порядка 1–2 мм обеспечивается при коротких лучах визирования (до 100 м) с применением теодолита 2Т2 и специальной методики наблюдений [6]. Именно такие условия для измерений существуют в здании Комаровского рынка. Для про-

ведения геодезических наблюдений на обложке покрытия нанесена 21 контрольная точка (рис. 5), точки равномерно расположены по всему своду [7]. Для определения координат этих точек с геодезических пунктов 18 и 19 (рис. 2) выполнены прямые угловые засечки, а затем решением обратных геодезических задач вычислены расстояния до них.

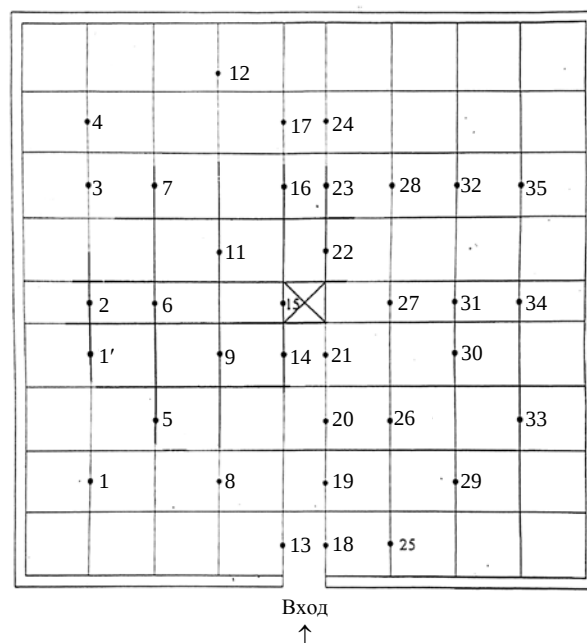


Рис. 5. Схема расположения контрольных точек на оболочке покрытия здания рынка, используемых для изучения ее прогибов:

- 1 – контрольные точки на оболочке и их номера

Fig. 5. Checkpoint layout on the shell covering the market building used to study its deflections:

- 1 – control points on the shell and their numbers

Проводимые геодезические наблюдения за деформациями с постоянных пунктов 18 и 19 повышают точность и достоверность получаемых результатов и исключают элемент случайности при их интерпретации. С этих пунктов точным теодолитом 2Т2 измеряли зенитные расстояния до контрольных точек на своде здания рынка и вычисляли соответствующие им углы наклона.

Для расчета превышений использовали известную формулу $h = dtg\alpha + i - v$ [6].

Теодолит 2Т2 (рис. 6) относится к точным геодезическим приборам. Используется для измерения углов в государственных сетях триангуляции и полигонометрии III и IV классов.

в сетях сгущения, в прикладной геодезии, для астрономических наблюдений, измерения расстояний по нитяному дальномеру зрительной трубы и определения магнитных азимутов.

Электронный тахеометр Leica TCR 1201 (рис. 7) – высокоточный и роботизированный прибор, оснащен двумя дальномерами: традиционным ИК-дальномером и безотражательным (RL) дальностью до 1000 м повышенной мощности. Точность измерения расстояний с отражателем составляет 2 мм за 1,5 с, в безотражательном режиме – 3 мм за 3–6 с. Предназначен для выполнения инженерно-геодезических работ любой сложности, может работать в четырех режимах: разделенном, полуавтоматическом, автоматическом и в режиме слежения.



Рис. 6. Теодолит 2Т2
Fig. 6. Theodolite 2T2



Рис. 7. Электронный тахеометр TCR 1201
Fig. 7. Electronic tachymeter TCR 1201

Тригонометрическое нивелирование осадочных марок коротким лучом (до 30 м) электронным тахеометром TCR 1201 может успешно конкурировать с традиционным геометрическим методом. Как показали экспериментальные измерения, средняя квадратическая погрешность составила всего 0,2 мм. Это дает возможность повысить производительность при больших перепадах высот, где заложены марки, отпадает необходимость в использовании инварных реек, измерения могут выполняться одним исполнителем [8, 9].

Определение прогибов оболочки покрытия здания рынка электронным тахеометром TCR 1201 выполняется в разделенном ре-

жиме (только углы наклона, как теодолитом 2Т2). Результаты этих измерений в сравнении с аналогичными, полученными в декабре 2014 г., приведены в табл. 2. Как следует из таблицы, все значения деформаций оболочки за указанный период колеблются от 0 до ± 4 мм и находятся в пределах нормы.

Таблица 2

Ведомость отметок и деформаций оболочки покрытия здания рынка, полученных с помощью 2Т2 и Leica TCR 1201

List of marks and deformations of the shell of the market building coating obtained using 2T2 and Leica TCR 1201

Номер точки	Отметка, м, определенная с помощью Т.18		Деформация, мм, с декабря 2014 г. по июль 2016 г.
	Декабрь 2014 г. (2Т2)	Июль 2016 г. (Leica)	
1	213,876	213,880	4
2	219,538	219,537	-1
3	217,739	217,743	4
4	215,221	215,222	1
5	220,747	220,751	4
6	222,492	222,491	-1
7	220,730	220,729	-1
8	220,207	220,208	1
9	224,026	224,029	3
12	217,538	217,537	-1
18	217,509	217,512	3
19	221,012	221,013	1
20	223,489	223,489	0
21	224,853	224,857	4
22	224,864	224,868	4
23	223,517	223,515	-2
24	221,065	221,067	2
29	218,170	218,174	4
30	222,076	222,079	3
31	222,482	222,485	3
32	220,718	220,720	2
35	217,707	217,707	0

Определение деформаций бортовых элементов здания рынка

Основой для наблюдений за горизонтальными смещениями бортовых элементов является схема расположения опорных пунктов с известными координатами и контрольных точек (по семь с каждой стороны здания рынка) через одну колонну (рис. 8).

Для выполнения высокоточных геодезических измерений применяли теодолит 2Т2 и электронный тахеометр Leica TCR 1201. В первом случае использовали способ круговых приемов, который позволил с опорных пунктов 16–19 определить горизонтальные углы на все обозначенные на схеме колонны боковых элементов.

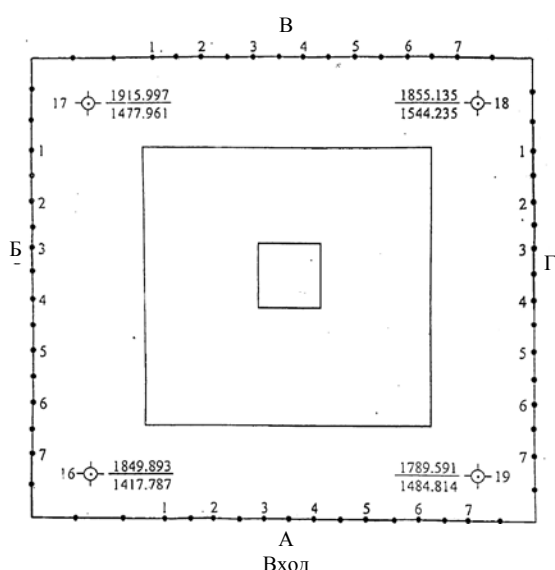


Рис. 8. Схема расположения контрольных точек по периметру здания рынка для измерения смещений бортовых элементов (система координат г. Минска)

Fig. 8. Checkpoint layout along the perimeter of the market building to measure displacements of onboard elements (Minsk coordinate system)

С помощью электронного тахеометра полярным способом измеряли горизонтальные углы и проложения до этих же точек в автоматическом режиме, которые заносили в память тахеометра [10].

На основании полученных величин способом прямой угловой засечки на ПВЭМ вычисляли координаты контрольных точек бортовых элементов, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

Ведомость деформаций бортовых элементов здания рынка, определенных теодолитом 2Т2 и электронным тахеометром Leica TCR 1201

List of deformations of the onboard elements of the market building, determined by theodolite 2T2 and electronic tacheometer Leica TCR 1201

Но- мер точки	Координата, м				Деформа- ция, мм, с декабря 2014 г. по июль 2016 г.	
	Декабрь 2014 г. (2T2)		Июль 2016 г. (Leica)			
	x	y	x	y	Δx	Δy
1	2	3	4	5	6	7
Сторона А						
1	1836,779	1422,615	1836,776	1422,618	3	−3
2	1828,713	1431,466	1828,717	1431,469	−4	−3
4	1812,373	1449,532	1812,371	1449,528	2	4
5	1804,516	1458,073	1804,520	1458,069	−4	4
6	1796,403	1466,950	1796,401	1466,952	2	−2
Сторона Б						
1	1911,292	1465,998	1911,293	1465,999	−1	−1

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
2	1902,433	1457,934	1902,435	1457,935	-2	-1
4	1884,404	1441,526	1884,401	1441,524	3	2
5	1875,823	1433,741	1875,822	1433,740	1	1
6	1866,898	1425,676	1866,901	1425,680	-3	-4
Сторона В						
1	1912,236	1491,689	1912,239	1491,688	-3	1
3	1896,105	1509,444	1896,102	1509,447	3	-3
4	1888,080	1518,344	1888,077	1518,346	3	-2
5	1879,980	1527,179	1879,978	1527,177	2	2
6	1871,916	1536,049	1871,914	1536,052	2	-3
Сторона Г						
2	1837,729	1537,435	1837,727	1537,436	2	-1
3	1828,821	1529,351	1828,818	1529,350	3	1
4	1820,256	1521,564	1820,257	1521,563	-1	1
6	1802,179	1505,172	1802,181	1505,174	-2	-2
7	1793,335	1497,113	1793,333	1497,114	2	-1

Как следует из таблицы, деформации бортовых элементов не превышают 2–4 мм и находятся в пределах нормы.

ВЫВОДЫ

1. Для проведения постоянного контроля состояния различных несущих конструкций здания Комаровского рынка создана густая геодезическая сеть вокруг него и внутри сооружения.

2. Разработан комплекс «Геодезические программы», который позволяет автоматизировать процессы математической обработки результатов высокоточных геодезических измерений, проводимых на территории рынка.

3. При контроле прогибов оболочки покрытия применен модифицированный способ тригонометрического нивелирования, который заключается в следующем. Длина визирного луча не превышала 100 м, геодезические наблюдения велись с двух опорных пунктов, закрепленных на антресолях здания рынка. Это исключало элемент случайности и повышало точность наблюдений до 1–2 мм. Осуществлен постепенный переход в измерениях от теодолита 2Т2 к электронному тахеометру Leica TCR 1201.

4. В связи с расположением здания рынка на болотистой местности и в зоне интенсивного движения транспорта авторами предложено проводить наблюдения осадочных деформаций свайного фундамента и угловых опор методом геометрического нивелирования II класса с использованием компенсаторного нивелира KoNi 007.

5. За 21 год проведения геодезического контроля все результаты деформаций несущих конструкций здания рынка с миллиметровой точностью, полученные оптико-механическими приборами, подтверждены измерениями высокоточным электронным тахеометром Leica TCR 1201. Это может свидетельствовать о правильной и эффективной методике геодезических наблюдений за стабильностью важного общественного объекта, которые будут продолжаться при дальнейшей его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аладов, В. Н. Архитектура предприятий общественного питания для стабильных коллективов / В. Н. Аладов. Минск: Вышэйш. шк., 1987. 188 с.
2. Михайлов, В. И. О разработке комплекса геодезических программ для студентов строительных специальностей / В. И. Михайлов, Г. В. Скребков // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. Т. 3. С. 24.
3. Геодезические работы в строительстве. Правила проведения: ТКП 45-1.03-26–2006. Введ. 01.07.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 33 с.
4. Инженерные изыскания для строительства: СНБ 1.02.01–96. Минск: Минстройархитектуры, 1996. 113 с.
5. Михайлов, В. И. Измерение осадочных деформаций производственных зданий и сооружений ОАО «Гродно Азот» / В. И. Михайлов, Е. Ю. Мысливчик // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2020. С. 255–259.
6. Инженерная геодезия / Е. Б. Ключин [и др.]; под ред. Д. Ш. Михелева. М.: Академия, 2000. 464 с.
7. Михайлов, В. И. Геодезический контроль прогибов оболочки покрытия, деформаций бортовых элементов и опор здания Комаровского рынка / В. И. Михайлов, Н. О. Куприенко, А. К. Шарыгина // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2017. Т. 3. С. 278.
8. Михайлов, В. И. Сравнительный анализ точности измерения вертикальных перемещений сооружений высокоточным нивелированием и электронным тахеометром / В. И. Михайлов, Г. В. Скребков // Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БНТУ, 2010. С. 126–128.
9. Михайлов, В. И. Деформационный мониторинг здания «Государственный музей истории театральной и музыкальной культуры Республики Беларусь» / В. И. Михайлов, С. И. Кононович, В. С. Студенко // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 15-й Междунар. науч.-практ. конф. БНТУ. Минск: БНТУ, 2017. Т. 3. С. 277.
10. Михайлов, В. И. Экспериментальные измерения крена башенных сооружений электронным тахеометром / В. И. Михайлов, С. И. Кононович, Ю. Н. Чиберкус // Наука и техника. 2015. № 2. С. 42–47.
11. Aladov V. N. (1987) Catering Architecture for Stable Teams. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 188 (in Russian).
12. Mikhailov V. I., Skrebkov G. V. (2012) On the Development of a Complex of Geodetic Programs for Students of Construction Specialties. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 10-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 3* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk, BNTU, 24 (in Russian).
13. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-1.03-26–2006. *Geodetic Works in Construction. Rules for Their Conduct*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2006. 33 (in Russian).
14. SNB [Construction Standards of the Republic of Belarus] *Engineering Surveys for Construction*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1996. 113 (in Russian).
15. Mikhailov V. I., Myslivchik E. Yu. (2020) Measurement of Sedimentary Deformations of Industrial Buildings and Structures of JSC “Grodno Azot”. *Dorozhnoe Stroitelstvo i ego Inzhenernoe Obespechenie: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Road Construction and its Engineering Support: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, BNTU, 255–259 (in Russian).
16. Klyushin E. B., Kiselev M. I., Mikhelev D. Sh., Fel'dman V. D. (2000) *Engineering Geodesy*. Moscow, Akademiya Publ. 464 (in Russian).
17. Mikhailov V. I., Kuprienko N. O., Sharygina A. K. (2017) Geodetic Control of Coating Shell Deflections, Deformations of Elements and Supports of the Komarovsky Market Building. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 3* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk, BNTU, 278 (in Russian).
18. Mikhailov V. I., Skrebkov G. V. (2010) Comparative Analysis of the Accuracy of Measuring Vertical Displacements of Structures by High-Precision Leveling and an Electronic Tacheometer. *Perspektivnye Napravleniya Proektirovaniya, Stroitel'stva i Ekspluatatsii Dorog, Mostov i Podzemnykh Sooruzhenii: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Promising Areas of Design, Construction and Operation of Roads, Bridges and Underground Structures: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, BNTU, 126–128 (in Russian).
19. Mikhailov V. I., Kononovich S. I., Studenko V. S. (2017) Deformation Monitoring of the Building “State Museum of the History of Theater and Musical Culture of the Republic of Belarus”. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 3* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk, BNTU, 277 (in Russian).
20. Mikhailov V. I., Kononovich S. I., Tchiberkus Yu. N. (2015) Experimental Measurements of Tower Construction Tilt Using Electronic Tacheometer. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 42–47 (in Russian).

Поступила 04.10.2022

Подписана в печать 06.12.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

Received: 04.10.2022

Accepted: 06.12.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-13-19>

UDC 528.5

Results of Many Years' Measurements Conducted at the Czech State Long Distances Measuring Standard Koštice

N. S. Kosarev^{1,2)}, J. Lechner¹⁾, V. A. Padve²⁾, I. A. Umnov¹⁾

¹⁾Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography (Zdiby, Czech Republic),

²⁾Siberian State University of Geosystems and Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. Currently, electronic total stations based on the principles of laser long-range distance measurement are used for collecting geospatial information. As time goes, in the process of using the electronic total stations, their technical parameters vary, necessitating periodic calibration of the instruments. Calibration of the long-range distance measurement laser component of the electronic total stations is carried out at specialized baselines and consists in testing the constant component of an electronic total station, determining the scale error and determining the cyclic error. In the territory of the Czech Republic, two geodetic baselines are operated, the National Calibration Baseline Hvězda and Koštice. Koštice is the Czech State Long Distances Measuring Standard, where electronic total stations are calibrated. From 2017 to 2020, about 600 electronic total stations by different manufacturers Leica Geosystems, Trimble, Topcon, Sokkia, Nikon, Pentax, South and Geomax were calibrated. The total number of measurements performed under the program in all combinations has equaled about 40000. In this paper, results of analysis many years' measurements performed at the geodetic baseline Koštice from 2017 to 2020 with electronic total stations manufactured by Leica Geosystems are presented. In total, 9186 measurements between the baseline sections 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7 and 1–8 have been analyzed. For each section, measurements have been detected which did not pass the Grubbs test criterion (the Smirnov – Grubbs test). Altogether, 261 outliers have been detected, totaling 3 % of the total number of measurements. After excluding the detected outliers with the algorithm of the parametric version of least squares optimization, the length of each section of the baseline was found, and the accuracy of the results obtained was evaluated. The calculated values of the length of the baseline sections are in generally good agreement with the results of the measurements performed at the geodetic baseline Koštice by the specialists from the laboratory of the Bundeswehr University in Munich (Germany) and the results of similar measurements conducted at the same baseline by the specialists from the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography (Czech Republic). For section 1–5, based on the results of both verifications, differences have been obtained exceeding the permissible values of the accuracy of determining baseline characteristics. This may be related to the fact that there are displacements of certain pillars, which mainly have a periodic character and depend on the season. To allow more specific assumptions regarding instability of certain pillars, it is recommended to verify the lengths of the baseline sections once in three months, according to the program in all combinations, which will allow comparison of the values of the confidence limits of the baseline section lengths and putting forward hypotheses regarding variations in the position of individual centers, so that the deviations revealed should be included into the residual uncertainty of length measurement.

Keywords: geodetic baseline Koštice, Smirnov – Grubbs test, algorithm of the parametric version of least squares optimization, displacements of pillars

For citation: Kosarev N. S., Lechner J., Padve V. A., Umnov I. A. (2023) Results of Many Years' Measurements Conducted at the Czech State Long Distances Measuring Standard Koštice. *Science and Technique*. 22 (1), 13–19. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-22-1-13-19>

Результаты многолетних измерений на линейном базисе Коштице

Канд. техн. наук, доц. Н. С. Косарев^{1,2)}, канд. техн. наук И. Лехнер¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. А. Падве²⁾, И. А. Умнов¹⁾

¹⁾Научно-исследовательский институт геодезии, топографии и картографии (Здибы, Чешская Республика),

²⁾Сибирский государственный университет геосистем и технологий (Новосибирск, Российская Федерация)

Реферат. В настоящее время для сбора геопространственной информации широко используются электронные тахеометры, основанные на принципах лазерной дальнометрии. В процессе эксплуатации изменяются их технические

Адрес для переписки

Косарев Николай Сергеевич
Сибирский государственный университет геосистем и технологий
ул. Плехотного, 10,
630108, г. Новосибирск, Российская Федерация
Тел.: +7 913 706-91-95
kosarevnsk@yandex.ru

Address for correspondence

Kosarev Nikolai S.
Siberian State University of Geosystems and Technologies
10, Plakhotnogo str.,
630108, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 706-91-95
kosarevnsk@yandex.ru

параметры и возникает необходимость периодической калибровки. Она осуществляется на специальных линейных базисах и состоит в проверке постоянной составляющей электронного тахеометра, определении ошибки масштаба и циклической ошибки. На территории Чешской Республики действуют два линейных базиса – Гвезда и Коштице. Последний является национальным государственным эталоном длины дальних расстояний, на котором осуществляются поверки электронных тахеометров. С 2017 по 2020 год здесь выполнена калибровка порядка 600 тахеометров различных фирм (Leica Geosystems, Trimble, Topcon, Sokkia, Nikon, Pentax, South и Geomax), общее количество измерений во всех комбинациях около 40000. В статье представлены результаты анализа многолетних измерений, проведенных на линейном базисе Коштице тахеометрами фирмы Leica Geosystems. Исследованы 9186 измерений между секциями базиса 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7 и 1–8. По каждой секции выявлялись измерения, которые не прошли заданный критерий Смирнова – Граббса, обнаружен 261 выброс, что составляет 3 % всех измерений. После исключения выбросов с помощью алгоритма параметрической версии МНК-оптимизации определена длина каждой секции базиса и выполнена оценка точности полученных результатов. Вычисленные значения длин секций в целом хорошо согласуются с результатами измерений, проведенных на линейном базисе Коштице Лабораторией геодезии Военного университета Мюнхена (Германия) и Научно-исследовательского института геодезии, топографии и картографии. По секции 1–5 в ходе обоих сравнений получены разности, превышающие допустимые значения точности определения характеристик базиса. Это может быть связано с тем, что по отдельным пунктам наблюдаются смещения, которые носят в основном периодический характер и зависят от времени года. Для более конкретных предположений о нестабильности отдельных пунктов рекомендуется проводить поверку длин секций базиса один раз в три месяца по программе во всех комбинациях, что позволит сопоставлять значения доверительных границ длин секций базиса и выдвигать гипотезы о колебаниях положения отдельных центров. В дальнейшем это позволит включать полученные смещения в остаточную неопределенность измерения длины.

Ключевые слова: линейный базис Коштице, тест Смирнова – Граббса, параметрическая версия МНК-оптимизации, смещения пунктов линейного базиса

Для цитирования: Результаты многолетних измерений на линейном базисе Коштице / Н. С. Косарев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 13–19. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-13-19>

Introduction

In the modern post-industrial society, obtaining information is a key factor for developing the economy of any country. The quality and relevance of obtaining this information are determined with the help of national meteorological services, as well as the organizations-in-charge, which may be invited to evaluate the accuracy, reliability and completeness of the geospatial data obtained.

Currently, to collect geospatial information, linear measurement tools are used, based on laser long-range measurements. Such tools primarily include electronic total stations and ground-based laser scanners. Such measurement tools mainly include electronic total stations and laser scanners. As during time, the technical parameters of instruments change in the process of operation of linear measurement tools, a necessity arises to calibrate them from time to time. Metrological calibration of electronic total stations is performed on the basis of the following regulatory and technical documentation [1–3].

Metrological calibration of electronic total stations is carried out on specialized baselines, which are geodetic installations containing a totality of special structures (pillars) erected in the location

and forming intervals the lengths of which are known to the accuracy set. For example, in the territory of the USA, the US National Geodetic Survey, in cooperation with different government institutions, universities, and professional communities, has established about 400 permanently functioning baselines, thanks to which surveyors have access to the local length standard and can verify electronic total stations in any part of the country [4].

The design of baselines is practically similar, the difference mainly caused only by the length and the number of pillars. Table 1 contains the total information with brief description of the structures of certain baselines.

In the territory of the Czech Republic, there are currently two functioning geodetic baselines, Hvězda and Košnice. The Hvězda baseline is 960 m long and consists of 7 pillars. The lengths of all the baseline sections have been measured in all combinations and are characterized by standard uncertainty of 1.0 mm. The Hvězda baseline is mainly used for calibrating electronic distance meters. The Košnice baseline is 1450 m long and consists of 12 pillars. Similarly to the Hvězda baseline, the Košnice baseline is used for calibrating electronic distance meters [17].

Table 1

The details of certain baselines

Name of baseline (country)	Year of establishment	Baseline length, m	Number of pillars	Section lengths, m
Nummela Standard Baseline (Finland) [5]	1947	864	6	24, 72, 216, 432, 864
The baseline of Research Institute of Physical, Technological and Radiometric Measurements (Russia) [6]	–	3275	10	915, 1285, 1294, 1318, 1366, 1531, 1638, 2538, 3275
Chengdu Standard Baseline (China) [5]	1998	1488	12	384, 576, 720, 762, 773, 788, 828, 888, 1008, 1248, 1488
PTB Baseline (Germany)* [7]	–	600	8	50, 100, 150, 250, 350, 500, 600
BEV Geodetic Baseline (Austria) [8]	2006	1080	7	30, 120, 270, 480, 750, 1080
UPV Calibration Baseline (Spain) [9, 10]	2007	330	6	28, 94, 198, 282, 330
Kyviskes Calibration Baseline (Lithuania) [11]	1996	1320	6	100, 360, 1120, 1300, 1320
Javoriv Geodetic Base (Ukraine) [12]	2003	2260	19	5, 10, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 130, 240, 589, 978, 2260
Gödöllő Standard Baseline (Hungary) [13, 14]	1986	864	5	24, 216, 432, 864
Vääna Calibration Baseline (Estonia) [15]	1987	1344	13	374, 376, 380, 384, 408, 432, 480, 576, 768, 960, 1152, 1344
O. P. Suchkov Standard Spatial Base (Russia) [16]	1976	1104	18	24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 408, 420, 648, 660, 888, 900, 1092, 1104

* 60 temperature gauges along the measurement line, 6 air moisture gauges, and 2 atmospheric pressure gauges.

The geodetic baseline Košice

The geodetic baseline Košice is located along the motorway Košice – Libčeves and was constructed between 1979 and 1980 not far from the village of Košice in the Louny district of the Czech Republic (Fig. 1).

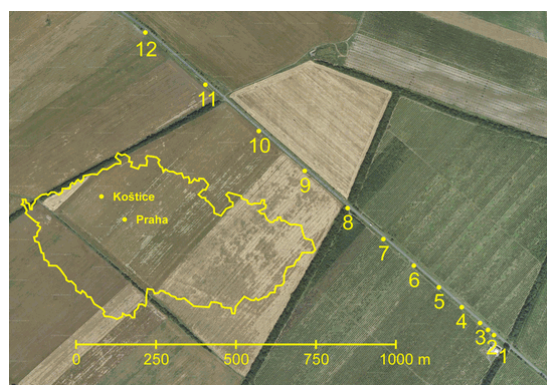


Fig. 1. A schematic of the geodetic baseline Košice

The geodetic baseline Košice consists of 12 pillars established to the depth from 5 to 9 m, situated at the distances from 25 to 1450 m. The pillars are equipped with devices for forced centering.

Based on the results of many years' measurements on the geodetic baseline Košice, displace-

ments of pillars were revealed in the range from decimal fractions of a millimeter to several millimeters per year, with deviations being mainly periodic [18]. To ensure investigation of periodic deviations, inclinometers have been established on pillars one and three (Fig. 2).



Fig. 2. Pillar one of the geodetic baseline Košice

On pillar one, the inclinometer PDS-FM3NT-30 by Senceive Ltd (Great Britain) is mounted, and on pillar three, the inclinometer JN 2201 by IFM Elec-

tronic GmbH (Germany). Table 2 shows certain technical characteristics of the inclinometers used.

Table 2

Certain technical characteristics of inclinometers

Parameter	JN 2201	PDS-FM3NT-30
Resolution	0.01°	0.0001°
Repeatability	$\leq \pm 0.01^\circ$	$\pm 0.0005^\circ$
Angular range	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$

In 2006, works were conducted at the geodetic baseline Košice on international comparison of lengths by a team of the Laboratory of Geodesy of the Bundeswehr University in Munich (BUM) (Germany). Table 3 contains the results of these comparisons [18].

From 2008, the geodetic baseline Košice is the Czech State Long Distances Measuring Standard,

and the National Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography (RIGTC), just like the laboratory of the Czech Metrology Institute, takes part in the research project of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

Materials and methods

From 2017 to 2020, calibration of about 600 electronic total stations manufactured by Leica Geosystems, Trimble, Topcon, Sokkia, Nikon, Pentax, South and Geomax was performed at the geodetic baseline Košice. The total number of measurements performed under the program in all combinations was about 40000, out of which only those measurements were selected for further analysis which were performed with the electronic total stations Leica between baseline sections 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7 and 1–8 (Tab. 4).

Table 3

Comparison results

Pillars	Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography		Bundeswehr University in Munich		Difference, mm
	Distance between pillars S, m	Standard uncertainty σ , mm	Distance between pillars S, m	Standard uncertainty σ , mm	
1–2	25.0892	0.5	25.0881	0.4	1.1
1–3	58.0519	0.5	58.0500	0.4	1.9
1–4	133.8831	0.6	133.8810	0.4	2.1
1–5	228.9825	0.8	228.9811	0.4	1.4
1–6	332.9594	1.1	332.9586	0.4	0.8
1–7	459.8596	1.5	459.8584	0.4	1.2
1–8	608.8432	1.9	608.8415	0.4	1.7
1–9	787.0671	2.4	787.0651	0.4	2.0
1–10	977.8891	3.0	977.8827	0.5	6.4
1–11	1199.9900	3.6	1199.9907	0.5	–0.7
1–12	1450.0077	4.4	1450.0112	0.5	–3.5

Table 4

Original data

Baseline section	2017		2018		2019		2020	
	Number of electronic total stations	Number of measure- ments	Number of electronic total stations	Number of measure- ments	Number of electronic total stations	Number of measure- ments	Number of electronic total stations	Number of measure- ments
1–2	66	336	105	483	102	474	64	288
1–3	66	333	105	483	102	474	64	288
1–4	66	318	105	459	102	465	64	288
1–5	66	282	105	393	102	429	64	264
1–6	66	207	105	312	102	342	64	216
1–7	66	204	105	312	102	339	64	204
1–8	66	198	105	297	102	309	64	189
Total	66	1878	105	2739	102	2832	64	1737

Each set of data obtained for different baseline sections (Tab. 4) was analyzed with the Smirnov – Grubbs test at the level of significance $\alpha = 0.05$ [19–20].

After excluding the detected outliers for each set of data with the algorithm of the parametric version of least squares optimization, the length of each verified baseline section was calculated

$$\mathbf{S} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{L}), \quad (1)$$

where $\mathbf{A} = \{1_i\}$ is the column vector, consisting of unities; $\mathbf{L} = \{S_i\}$ is the vector of free terms, which are a totality of the measurement results S_i , performed on the processed section; $\mathbf{K}$ is the diagonal covariance matrix of the type of $\mathbf{K} = \text{diag}\{m_i^2\}$, where m_i stands for root mean-square errors of measuring distances S_i with electronic total stations. Index i varies from unity to the number of measurements in a section equal to n .

The precision of determining the section lengths calculated by algorithm (1) was evaluated using the formula

$$m_s = \mu \sqrt{(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{A})^{-1}}, \quad (2)$$

where μ^2 is the a-posteriori value of the scale precision index (SPI) [21].

Then the zero hypothesis was verified regarding insignificance of the difference of the a-posteriori value of the SPI μ^2 from its a priori value σ_0^2 , theoretically equal to a unity

$$H_0 = \{E(\sigma^2) = \sigma_0^2 = 1\}, \quad (3)$$

where $E(\sigma^2)$ is the average of distribution of the scale precision index (SPI).

The hypothesis was verified with the following test

$$\chi_s^2 = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{S} - \mathbf{L})^T \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{S} - \mathbf{L}) \quad (4)$$

and by the 5 % χ^2 -distribution with the degree of freedom $(n - 1)$

$$\chi_T^2 = [\chi_{\alpha/2; n-1}^2; \chi_{1-\alpha/2; n-1}^2]. \quad (5)$$

When $\chi_s^2 \notin \chi_T^2$, the zero hypothesis was rejected.

Results

Out of 9186 measurement values obtained by the specialists of RIGTC when calibrating the Leica electronic total stations, between sections 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7 and 1–8, according to the Smirnov – Grubbs test, 261 outliers were detected, which constitutes 3 % of the total number of measurements. After excluding the detected outliers, the lengths of eight sections 1–2, ..., 1–8 were found with the algorithm of the parametric version of least squares optimization (2) for the measurements made in 2017–2020 and the measurements made in the period from 2017 to 2020. Table 5 contains the results of calculating the section lengths and evaluation of the accuracy of the obtained values.

Then the obtained values of the section lengths were compared with the results of measurements performed at the Košice baseline, at international comparison of lengths performed by the specialists of the Laboratory of Geodesy of the BUM and of the RIGTC. The comparison results are shown in Tab. 6.

Table 5

The calculated baseline section lengths, m, and their SPI, mm

Pillars	2017		2018		2019		2020		2017–2020	
	S	m_s	S	m_s	S	m_s	S	m_s	S	m_s
1–2	25.0906	0.1	25.0907	0.1	25.0896	0.1	25.0914	0.1	25.0903	0.5
1–3	58.0492	0.1	58.0505	0.1	58.0495	0.1	58.0510	0.1	58.0501	0.5
1–4	133.8797	0.1	133.8810	0.1	133.8799	0.1	133.8808	0.1	133.8805	0.5
1–5	228.9783	0.2	228.9791	0.1	228.9795	0.1	228.9801	0.2	228.9795	0.5
1–6	332.9576	0.2	332.9593	0.2	332.9592	0.1	332.9602	0.2	332.9592	0.5
1–7	459.8582	0.2	459.8604	0.2	459.8606	0.2	459.8604	0.2	459.8600	0.6
1–8	608.8404	0.2	608.8423	0.2	608.8429	0.2	608.8447	0.2	608.8427	0.6

Table 6

The results of comparison of baseline section lengths

Pillars	The average value for 2017–2020	BUM (2006)	RIGTC (2007)	Differences, mm		m ₂ , mm	m ₃ , mm	m ₄ , mm	Allowan- ce 2–3	Toleran- ce 2–4
				2–3	2–4					
1	Section lengths, m			5	6	7	8	9	10	11
	2	3	4							
1–2	25.0903	25.0881	25.0892	2.2	1.1	0.5	0.4	0.5	1.3	1.4
1–3	58.0501	58.0500	58.0519	0.1	–1.8	0.5	0.4	0.5	1.3	1.4
1–4	133.8805	133.8810	133.8831	–0.5	–2.6	0.5	0.4	0.6	1.3	1.5
1–5	228.9795	228.9811	228.9825	–1.6	–3.0	0.5	0.4	0.8	1.3	1.8
1–6	332.9592	332.9586	332.9594	0.6	–0.2	0.5	0.4	1.1	1.3	2.4
1–7	459.8600	459.8584	459.8596	1.6	0.4	0.6	0.4	1.5	1.4	3.2
1–8	608.8427	608.8415	608.8432	1.2	–0.5	0.6	0.4	1.9	1.4	3.9

In Tab. 6 the permissible values of differences in columns 2–3 and 2–4 (d^{perm}) were formed at the level of significance $\alpha = 0.05$ in supposition of the fact that these differences have standard normal distribution: $d^{perm} = 1.96m_d$, where the values $m_d = \sqrt{m_2^2 + m_{3(4)}^2}$.

The calculated values of the section lengths and shown in Tab. 6 (column 2) are generally in good agreement with the measurement results (column 3), performed at the Košice baseline by the specialists of the Laboratory of Geodesy of the BUM and the results of similar measurements (column 4) performed at the same baseline by the specialists of RIGTC. For section 1–5, based on the results of both comparisons, differences were obtained, exceeding the permissible values of the precision of determining the baseline characteristics. This may be related to the fact that for certain pillars, deviations were observed, which were, as noted above, mostly periodic.

To allow more specific assumptions regarding instability of certain pillars, it is recommended to verify the lengths of the baseline sections once in three months, according to the program in all combinations, which will allow comparison of the values of the confidence limits of the baseline section lengths and putting forward hypotheses regarding variations in the position of individual centers, so that the deviations revealed should be included into the residual uncertainty of length measurement.

CONCLUSION

The studies conducted on the results of the works performed by the specialists of the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography (the laboratory of the Czech Metrology Institute), as well as comparison of these results with the materials obtained by the specialists of the Laboratory of Geodesy of the Bundeswehr University in Munich (Germany), allow us to agree with the previously made assumptions regarding certain displacement of individual pillars at the Košice baseline. Therefore, the specialists of the Engineering Geodesy and Metrology Department of the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography of the Czech Republic perform repeated measurements of the section lengths of the baseline once every two months according to the program in all combinations, thus determining the relevant standard lengths of each baseline section.

REFERENCES

1. International Organization for Standardization (2002). ISO 17123-4:2001. *Optics and Optical Instruments – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments. Part 4. Electro-Optical Distance Meters (EDM Instruments)*. Geneva, Switzerland.
2. Joint Committee for Guides in Metrology (2008). JCGM 100:2008. *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.
3. *EDM Calibration Handbook* (2014). Department of Transport, Planning and Local Infrastructure Victoria. Available at: https://nanopdf.com/download/edm-handbook-edition-december-2014_pdf.

4. Dracup J. F., Fronczek C. J., Tomlinson R.W. (1977) *Establishment of Calibration Base Lines*. NOAA Technical Memorandum (NOS NGS-8). NGS, USA. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/23408>.
5. Jokela J. (2014) Length in Geodesy – On Metrological Traceability of a Geospatial Measurand. Doctoral Dissertation. *Aalto University*. Available at: <https://aaltoDoc.aalto.fi/handle/123456789/14055>.
6. Shchipunov A. N., Tatarenkov V. M., Denisenko O. V., Sil'vestrov I. S., Fedotov V. N., Vasil'ev M. Yu., Sokolov D. A. (2015) A Set of Standards for Support of the Uniformity of Measurements of Length in the Range above 24 m: Current State and Prospects for Further Development. *Measurement Techniques*, 57 (11), 1228–1232. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0610-9>
7. Pollinger F., Meyer T., Beyer J., Doloca N. R., Schellin W., Niemeier W., Jokela J., Hakli P., Abou-Zeid A., Meiners-Hagen K. (2012). The Upgraded PTB 600 m Baseline: a High-Accuracy Reference for the Calibration and the Development of Long Distance Measurement Devices. *Measurement Science Technology*, 23, 094018:11. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/9/094018>.
8. Jokela J., Häkli P., Kugler R., Skorpil H., Matus M., Poutanen M. (2010) Calibration of the BEV Geodetic Baseline. *FIG Congress 2010, Sydney, April 11–16, 2010*. Available at: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts05c/ts05c_jokela_hakli_et_al_3873.pdf.
9. García-Asenjo L., Baselga S., Garrigues P. (2016) Deformation Monitoring of the Submillimetric UPV Calibration Baseline. *Journal of Applied Geodesy*, 11 (2), 107–114. <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0018>.
10. García-Asenjo L., Baselga S., Atkins C., Garrigues P. (2021) Development of a Submillimetric GNSS-Based Distance Meter for Length Metrology. *Sensors*, 21 (4), 1145. <https://doi.org/10.3390/s21041145>.
11. Būga A., Birvydienė R., Kolosovskis R., Krikštaponis B., Obuchovski R., Paršeliūnas E., Putrimas R., Šlikas D. (2016) Analysis of the Calibration Quality of the Kyviškės Calibration Baseline. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51, 505–514. <https://doi.org/10.1007/s40328-015-0140-6>.
12. Trevogo I. S., Lechner J., Tora B., Černota P., Staňková H. (2020) Geodetic Activity for Compatibility of the Unit of Length of Geodetic Bases Kostice (Czech Republic) and Javoriv (Ukraine). *Inžinieria Mineralna*, 1 (1), 35–40. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-01-05>.
13. Mihály S. (2005) Space Referencing Core Data for GI in Hungary. *FIG Congress 2005, Cairo, April 16–21, 2005*. Available at: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/cairo/papers/ts_21/ts21_04_mihaly.pdf.
14. *Geodetic Operations in Finland 2000–2003*. Available at: <https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/NationalReports/2003/Finland.pdf>.
15. Agne V. (2015) *Elektrooniliste Kaugusmõõturite Kalibreerimine* [Calibration of Electronic Distance Meters]. Available at: <https://dSPACE.emu.ee/xmlui/handle/10492/2138> (in Estonian).
16. Karpik A. P., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Y. (2018). Operational Experience of GNSS Receivers with Chip Scale Atomic Clocks for Baseline Measurements. *Geodesy and Cartography*, 44 (4), 140–145. <https://doi.org/10.3846/gac.2018.4051>.
17. Slaboch V., Lechner J., Pizur M. (2003) Implementation of ISO 17025:2000 in the Geodetic Metrology Laboratories and their Role in the National Metrology System. *FIG Congress 2003, Paris, April 13–17, 2003*. Available at: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_12/TS12_2_Slaboch_et_al.pdf.
18. Lechner J., Cervinka L., Umnov I. (2008) Geodetic Surveying Tasks for Establishing a National Long Length Standard Baseline. *FIG Congress 2008, Stockholm, June 14–19, 2008*. Available at: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2008/papers/ts03h/ts03h_02_lechner_et_al_203076.pdf.
19. Grubbs F. E., Beck G. (1972) Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations. *Technometrics*, 14, 847–854. <https://doi.org/10.1080/00401706.1972.10488981>.
20. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2017) Method and Algorithms of Calculation of Parameters of Reliability in Accordance with Multivariate Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 16–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29> (in Russian).
21. Padve V. A. (2018). *Mathematical Processing and Interpretation of the Results of Geodetic Measurements. Part 2: Synthesized and Combined Algorithms for Precision LSM Optimization and Analysis of Measurement Results*. Novosibirsk, SSUGT Publ. 134 (in Russian).

Received: 27.04.2022

Accepted: 26.07.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26>

УДК 621.7.08

Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий

Асп. К. Ю. Быков¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, С. А. Ленкевич¹⁾, В. В. Власов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Разработана акустическая методика и получены выражения для определения начальной скорости деформирования v_0 при высокоскоростной штамповке стержневых изделий, позволяющие найти наиболее рациональную схему расположения записывающего устройства относительно элементов установки. Сущность разработанной методики заключается в регистрации с помощью записывающего устройства звуковых волн, образующихся в процессе вылета ударника из ствола установки и его дальнейшего соударения с формообразующим пуансоном с последующим нахождением времени Δt , за которое ударник проходит расстояние между двумя известными точками своей траектории. В свою очередь, величина Δt определяется как разность между временем регистрации звуковой волны, образовавшейся от вылета ударника из ствола установки, и временем регистрации звуковой волны, образовавшейся от соударения ударника с формообразующим пуансоном. Начальная скорость деформирования, зарегистрированная с помощью разработанной методики в ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий, составила $v_0 = 115,46$ м/с.

Ключевые слова: методика измерения, звуковая волна, схема деформирования, высокоскоростная штамповка, записывающее устройство, схема расположения, звуковая дорожка

Для цитирования: Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий / К. Ю. Быков [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26>

Acoustic Method for Recording Initial Deformation Rate at High-Speed Forging of Rod Products

K. Yu. Bykov¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, S. A. Lenkevich¹⁾, V. V. Vlasov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An acoustic methodology has been developed and expression have been obtained for determining the initial deformation rate v_0 during high-speed forging of rod products. The most rational layout of the recording device relative to the installation elements has been established while using the obtained expressions. The essence of the developed technique lies in recording, using a recording device, sound waves generated during the departure of the impactor from the shaft

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

of the installation and its further collision with the shaping punch, followed by finding the time Δt during which the impactor travels the distance L between two known points of its trajectory. In turn, the value Δt is defined as the difference between the recording time of the sound wave generated by the departure of the impactor from the shaft of the installation, and the recording time of the sound wave generated by the collision of the impactor with the shaping punch. The initial deformation rate, registered using the developed technique during the implementation of the process of high-speed forging of rod products, was $v_0 = 115.46$ m/s.

Keywords: measurement technique, sound wave, deformation scheme, high-speed forging, recording device, layout plan, soundtrack

For citation: Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Lenkevich S. A., Vlasov V. V. (2023) Acoustic Method for Recording Initial Deformation Rate at High-Speed Forging of Rod Products. *Science and Technique*. 22 (1), 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26> (in Russian)

Введение

Для оценки напряженно-деформированного состояния заготовки и выбора режимов нагружения при высокоскоростной штамповке необходимо иметь представление о взаимосвязи начальных параметров процесса (начальная скорость деформирования v_0 , начальная температура заготовки и т. д.) и конечного результата деформации при выдавливании заготовок из различных материалов. Если начальные параметры процесса выбраны неправильно, то эффективность деформации заготовок значительно уменьшается [1–4].

За счет больших значений скорости (от 25 м/с и выше) и короткой длительности процесса (300–900 мкс) регистрация начальной скорости деформирования, за которую принимается скорость движения инструмента в момент соударения с заготовкой, при высокоскоростной штамповке стержневых изделий является сложной задачей.

В настоящее время для регистрации начальной скорости деформирования v_0 широко используют различные схемы и виды оборудования (фотоэлектронные измерители, осциллографы, хронографы, высокоскоростные фото- и видеокамеры и т. д.). Авторами [4] разработаны схемы дискретного и непрерывного действия, позволяющие производить регистрацию начальной скорости деформирования v_0 , полученной за счет поочередного затемнения и освещения фотодиода, в виде осциллограммы. В работах [5, 6] описаны применяемые скоростные съемочные камеры, а в [7–9] – сверхскоростные фоторегистраторы. Однако по тем или иным причинам (особенности конструкции оборудования, габаритные размеры

инструмента, дороговизна измерительного оборудования, сложность синхронизации моментов начала деформации и съемки и т. д.) предложенные методики регистрации начальной скорости деформирования не всегда могут быть использованы.

В данной работе предложена акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий.

Основная часть

Предложенная методика регистрации начальной скорости деформирования v_0 использовалась при высокоскоростной штамповке на мощной (с энергией удара до 240 кДж) горизонтальной установке, разработанной на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, конструктивная схема которой представлена на рис. 1. Данная установка предназначена для получения лабораторных и промышленных образцов инструмента (стержневых и формообразующих деталей штамповой оснастки) [1, 2].

Установка состоит из рамы 1, с одной стороны которой жестко закреплен ствол 2 с клиновым затвором 3, а с другой стороны – сборный шабот 4. На шаботе в регулируемых направляющих 5 и упорах 6 смонтирован подвижной переходник 7 для крепления штампа. Изменение положения переходника по высоте осуществляется винтом 8. Установка оснащена для снижения уровня шума от выброса газов высокого давления съемным глушителем 9, для обеспечения безопасных условий труда – ловителем 10 [1, 2].

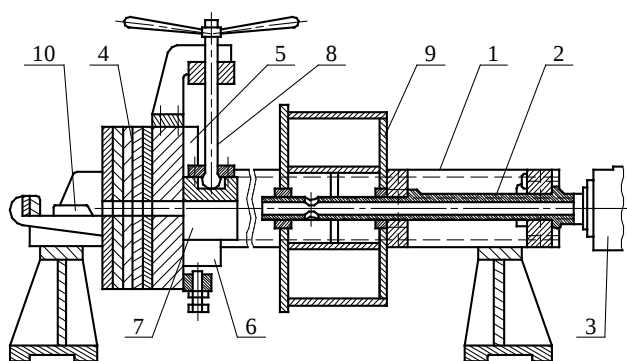


Рис. 1. Конструктивная схема горизонтальной установки с энергией удара 240 кДж [1, 2]

Fig. 1. Structural scheme of horizontal installation with impact energy 240 kJ [1, 2]

Схема высокоскоростной штамповки реализуется следующим образом (рис. 2). Ударник 1, разогнанный с помощью выброса газов высокого давления, вылетает из ствола 2 с начальной скоростью v_0 и соударяется с формообразующим пуансоном 3, который за счет полученного

импульса деформирует предварительно нагретую заготовку 4.

Для регистрации начальной скорости деформирования v_0 разработана акустическая методика, схема регистрации звуковых волн в которой представлена на рис. 3.

При вылете ударника 1 из ствола 2 за счет выброса газов высокого давления на срезе ствола образуется звуковая волна, которая, преодолев расстояние l_1 (расстояние от среза ствола до записывающего устройства 4), регистрируется записывающим устройством. Затем, когда ударник преодолевает путь, равный разности расстояний L (длина от среза ствола до торцевой плоскости формообразующего пуансона 3) и l_y (длина ударника), и соударяется с формообразующим пуансоном, образуется вторая звуковая волна, которая, преодолев расстояние l_2 (расстояние от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства), также регистрируется записывающим устройством.

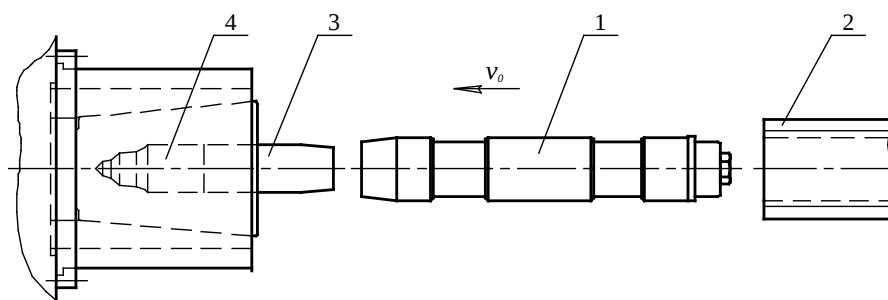


Рис. 2. Схема высокоскоростной деформации

Fig. 2. Scheme of high-speed deformation

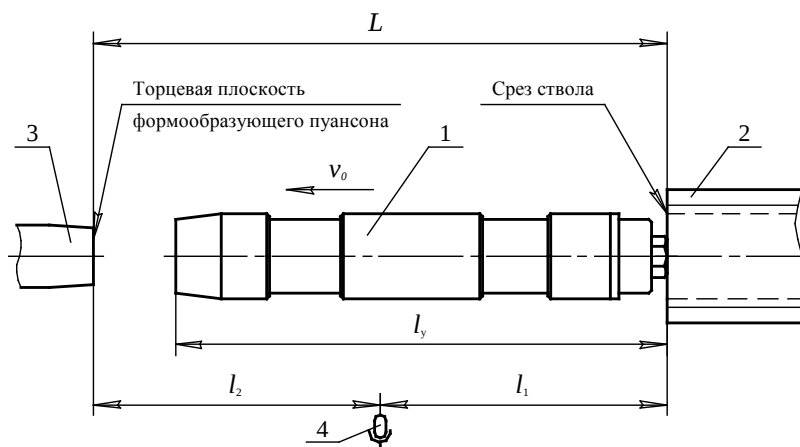


Рис. 3. Схема регистрации звуковых волн

Fig. 3. Scheme for recording sound waves

Расшифровку полученной звуковой дорожки можно производить с помощью как осциллографов (цифровых или аналоговых), так и программных средств, предназначенных для работы со звуком [10–12].

Полученная звуковая дорожка при идеальных условиях записи (отсутствие посторонних шумов, эха и т. д.) имеет вид, схожий с представленным на рис. 4. Так, согласно принятой модели (рис. 3), звуковые волны, образующиеся от выброса газов высокого давления и соударения ударника с формообразующим пуансоном, за счет большой интенсивности будут выделяться характерными пиками. Временной интервал между этими пиками равен времени Δt , за которое ударник преодолевает заведомо известное расстояние.

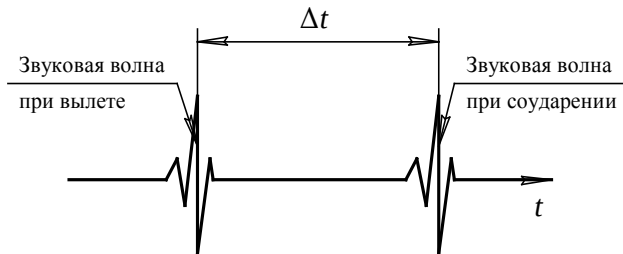


Рис. 4. Теоретическое изображение идеальной звуковой дорожки, получаемой в ходе высокоскоростной штамповки

Fig. 4. Theoretical image of an ideal soundtrack obtained during high-speed forging

Учитывая все вышесказанное, начальную скорость деформирования v_0 определяем по выражению

$$v_0 = \frac{L - l_y}{\Delta t}, \quad (1)$$

где v_0 – начальная скорость деформирования (скорость движения ударника); L – расстояние между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона (рис. 3); l_y – длина ударника; Δt – время, за которое ударник преодолевает расстояние между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона,

$$\Delta t = t_y - t_b, \quad (2)$$

t_y – время соударения ударника и формообразующего пуансона; t_b – время выброса газов высокого давления из ствола установки.

Для более детального анализа процесса распространения и фиксации звуковых волн, возникающих при вылете ударника из ствола и его последующем соударении с формообразующим пуансоном (рис. 3), рассмотрим теоретическую хронограмму, представленную на рис. 5.

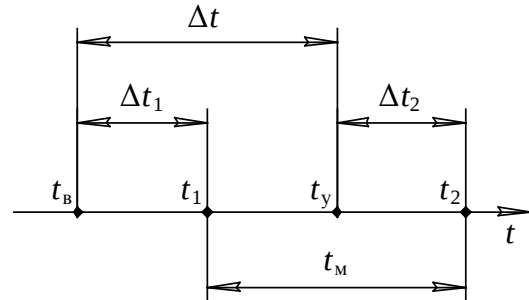


Рис. 5. Теоретическая хронограмма

Fig. 5. Theoretical chronogram

Согласно ранее принятой модели, в момент вылета ударника из ствола образуется звуковая волна, которая на теоретической хронограмме отмечена точкой t_b , а звуковая волна, характеризующая момент соударения ударника и формообразующего пуансона, отмечена точкой t_y .

Однако следует учитывать тот факт, что звук имеет собственную скорость распространения (в воздухе при нормальных условиях $v_{зв} \approx 343,2$ м/с). Таким образом, звуковая волна от вылета ударника из ствола, регистрируемая записывающим устройством, на теоретической хронограмме будет смещена относительно реального времени вылета t_b на величину Δt_1 (время, за которое звуковая волна преодолет расстояние l_1 – от среза ствола до записывающего устройства) и характеризоваться точкой t_1 , а звуковая волна от соударения ударника и формообразующего пуансона, регистрируемая записывающим устройством, будет смещена относительно реального времени соударения t_y на величину Δt_2 (время, за которое звуковая волна преодолет расстояние l_2 – от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства) и характеризоваться точкой t_2 .

Исходя из вышесказанного, значения времени t_y и t_b будут определяться выражениями:

$$t_b = t_1 - \Delta t_1, \quad (3)$$

где t_1 – время регистрации записывающим устройством звуковой волны на срезе ствола в момент вылета ударника; Δt_1 – то же, за которое звуковая волна преодолевает расстояние l_1 ;

$$t_y = t_2 - \Delta t_2, \quad (4)$$

где t_2 – время регистрации записывающим устройством звуковой волны в момент соударения ударника и формообразующего пуансона; Δt_2 – то же, за которое звуковая волна преодолевает расстояние l_2 .

В свою очередь, слагаемые Δt_1 и Δt_2 , входящие в состав выражений (3) и (4), будут определяться по зависимостям:

$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{v_{зв}}, \quad (5)$$

где l_1 – расстояние от среза ствола до записывающего устройства; $v_{зв}$ – скорость звука;

$$\Delta t_2 = \frac{l_2}{v_{зв}}, \quad (6)$$

где l_2 – расстояние от торцевой плоскости формообразующего пуансона до записывающего устройства.

Выражение (1) с учетом (2)–(6) принимает вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) + \left(\frac{l_1 - l_2}{v_{зв}} \right)}. \quad (7)$$

Анализ входящих в знаменатель выражения (7) слагаемых показывает, что первое слагаемое отражает разность между временем вылета ударника из ствола и временем соударения ударника и формообразующего пуансона, регистрируемыми записывающим устройством, а второе слагаемое является поправкой на скорость звука.

Проведя более детальный анализ выражения (7), можно установить, что существуют три предельные схемы расположения записывающего устройства относительно среза ство-

ла и торцевой плоскости формообразующего пуансона.

Первый случай, когда записывающее устройство расположено непосредственно возле среза ствола, т. е. $l_1 = 0$. Тогда выражение (7) примет вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) - \left(\frac{l_2}{v_{зв}} \right)}. \quad (8)$$

Второй случай, когда записывающее устройство расположено непосредственно возле торцевой плоскости формообразующего пуансона, т. е. $l_2 = 0$. Тогда (7) запишем

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1) + \left(\frac{l_1}{v_{зв}} \right)}. \quad (9)$$

Третий случай, когда записывающее устройство расположено равноудаленно между срезом ствола и торцевой плоскостью формообразующего пуансона, т. е. $l_1 = l_2$. С учетом этого (7) принимает вид

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1)}. \quad (10)$$

Данная схема размещения записывающего устройства является наиболее рациональной, так как в этом случае поправка на скорость звука будет равняться нулю, что, в свою очередь, упрощает необходимые расчеты.

В ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий получено действительное изображение звуковой дорожки, представленное на рис. 6. Данное изображение несколько отличается от теоретического, что объясняется короткой длительностью процесса, а также различной интенсивностью звуковой волны, исходящей от выброса газов высокого давления и соударения ударника с формообразующим пуансоном.

Запись звука производилась по схеме с равноудаленным расположением записывающего устройства относительно среза ствола и торцевой плоскости формообразующего пуансона. Длина ударника, которую замеряли с помощью

штангенциркуля ШЦ-II-400-0,05 (ГОСТ 166-89), составила $l_y = 336$ мм (погрешность измерения $\pm 0,05$ мм). Расстояние L от среза ствола до торцевой плоскости формообразующего пуансона, измеренное с помощью лазерного дальномера Bosch GLM 40, составило $L = 448$ мм, при этом точность измерения, согласно паспортным данным прибора, равнялась $\pm 1,5$ мм. Запись звуковой дорожки осуществляли с помощью микрофона Behringer C-1 и звуковой карты Behringer U-Phoria с частотой дискретизации 192 кГц, а ее расшифровку – с помощью программного обеспечения Audacity.

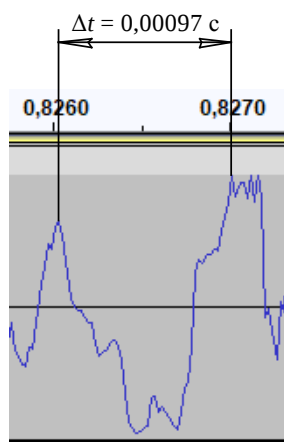


Рис. 6. Действительная звуковая дорожка, полученная в ходе высокоскоростной штамповки

Fig. 6. Actual soundtrack obtained by high-speed forging

Исходя из принятой схемы расположения записывающего устройства, рассчитаем начальную скорость деформирования v_0 по выражению (10)

$$v_0 = \frac{L - l_y}{(t_2 - t_1)} = \frac{0,448 \text{ м} - 0,336 \text{ м}}{0,00097 \text{ с}} = 115,46 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Таким образом, полученные выражения (7)–(10) позволяют не только определить начальную скорость деформирования v_0 , но и выбрать предпочтительную схему размещения записывающего устройства относительно элементов установки.

ВЫВОДЫ

1. Разработана акустическая методика определения начальной скорости деформирования

ния v_0 при высокоскоростной штамповке стержневых изделий, включающая регистрацию звуковых волн, образующихся в процессе вылета ударника из ствола установки и его последующего соударения с формообразующим пуансоном.

2. Установлена наиболее рациональная схема расположения записывающего устройства относительно элементов установки.

3. Получены выражения для определения начальной скорости деформирования v_0 при высокоскоростной штамповке стержневых изделий в зависимости от схемы расположения записывающего устройства относительно элементов установки.

4. Начальная скорость деформирования, зарегистрированная с помощью разработанной методики в ходе реализации процесса высокоскоростной штамповки стержневых изделий, составила $v_0 = 115,46$ м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
2. Здор, Г. Н. Технология высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
3. Барановский, М. А. Влияние начальной скорости деформирования и массы пуансон-бойка на удельную энергию деформирования / М. А. Барановский // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 5. Минск: Вышэйш. шк., 1974. С. 72–75.
4. Качанов, И. В. Регистрация кинематических параметров процесса ударного выдавливания стержневых изделий с плакированием торца / И. В. Качанов, В. Н. Шарий // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 31. Минск: БНТУ, 2008. С. 198–207.
5. Беляев, В. И. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев [и др.]. Минск: Наука и техника, 1976. 224 с.
6. Капранов, В. Н. Исследование процесса высокоскоростного горячего выдавливания полостей кузнечных штампов: автореф. ... дис. канд. техн. наук / В. Н. Капранов. Омск, 1974. 19 с.
7. Анципорович, П. П. Пластическое течение металлов и сплавов при холодном высокоскоростном выдавливании: автореф. ... дис. канд. техн. наук / П. П. Анципорович. Минск, 1970. 17 с.
8. Исследование кинематических и силовых параметров высокоскоростного прессования / Л. С. Шабека

- [и др.] // *Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр.* Вып. 1. Минск: Вышэйш. шк., 1970. С. 77–79.
9. Вагин, В. А. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В. А. Вагин, Г. Н. Здор, В. С. Мамутов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.
 10. Дьяконов, В. П. Современная осциллография и осциллографы / В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 320 с. (Библиотека инженера).
 11. Афонский, А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 248 с. (Библиотека инженера).
 12. Афонский, А. А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 544 с. (Библиотека инженера).

Поступила 02.12.2022

Подписана в печать 04.01.2023

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Kachanov I. V. (2002) *High-Speed Hot Extrusion of Rod Products*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 327 (in Russian).
2. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. (2010) *Technology of High-Speed Material Deformation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 456 (in Russian).
3. Baranovsky M. A. (1974) Influence of the Initial Deformation Rate and the Mass of the Punch-Striker on the Specific Deformation Energy. *Metallurgiya: Resp. Mezhd. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 5* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 5]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 72–75 (in Russian).
4. Kachanov I. V., Shary V. N. (2008) Registration of Kinematic Parameters of the Process of Impact Extrusion of Core Products with End Cladding. *Metallurgiya: Resp.*

- Mezhved. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 31* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 31]. Minsk, Belarusian National Technical University. 198–207 (in Russian).
5. Belyaev V. I., Kovalevskii V. N., Smirnov G. V., Chekan V. A. (1976) *High-Speed Deformation of Metals*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 224 (in Russian).
 6. Kapranov V. N. (1974) *Study of the Process of High-Speed Hot Extrusion of Cavities of Forging Dies*. Omsk. 19 (in Russian).
 7. Antsiporovich P. P. (1970) *Plastic Flow of Metals and Alloys during Cold High-Speed Extrusion*. Minsk. 17 (in Russian).
 8. Shabeka L. S. [et al.] (1970) Study of Kinematic and Power Parameters of High-Speed Pressing. *Metallurgiya: Resp. Mezhd. Sb. Nauch. Tr. Vyp. 1* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Iss. 1]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 77–79 (in Russian).
 9. Vagin V. A., Zdor G. N., Mamutov V. S. (1990) *Methods for Studying High-Speed Seformation of Metals*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 207 (in Russian).
 10. Dyakonov V. P. (2013) *Modern Oscillography and Oscilloscopes. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 320 (in Russian).
 11. Afonsky A. A., Dyakonov V. P. (2010) *Digital Spectrum, Signal and Logic Analyzers. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 248 (in Russian).
 12. Afonsky A. A., Dyakonov V. P. (2010) *Measuring Instruments and Mass Electronic Measurements. Series "Engineer's Library"*. Moscow, SOLON-Press Publ. 544 (in Russian).

Received: 02.12.2022

Accepted: 04.01.2023

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33>

УДК 620.197:669:621.794

Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾, А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Существующие процессы получения черных износостойких покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Большой интерес для формирования светопоглощающих покрытий вызывает метод МДО, характеризующийся как надежный и экологически безопасный процесс, обеспечивающий формирование твердого керамикоподобного оксидного слоя с высокой коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к основе. Поэтому разработка методов получения качественных черных МДО-покрытий, обладающих высокими оптическими и механическими характеристиками, является в настоящее время актуальной задачей. В статье приведены результаты исследования структуры и свойств черных керамических покрытий на алюминиевом сплаве АМг₂, полученных методом микродугового оксидирования с применением силикатно-щелочного и силикатно-фосфатного электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия. В качестве дополнительных элементов, обеспечивающих окрашивание покрытий, в электролиты добавляли вольфрамвоокислый натрий и ферроцианид калия концентрацией от 0,5 до 2,0 г/л. Установлено, что наиболее насыщенные черные покрытия в силикатно-щелочном электролите формируются при добавлении 1,5–2,0 г/л вольфрамата натрия, а в силикатно-фосфатном электролите при добавлении 1,5 г/л ферроцианида калия. Применение электролита, содержащего вольфрамат натрия, позволяет сформировать покрытия с меньшей высотой микронеровностей ($R_a = 0,97\text{--}1,11$ мкм) по сравнению с покрытиями, полученными в электролите, содержащем ферроцианид калия (R_a до 4,20 мкм). Максимальная износостойкость полученных покрытий (скорость износа $(0,38\text{--}0,59) \cdot 10^{-4}$ мм³/(м·Н)) достигается при обработке в исследованных электролитах продолжительностью 10 мин. При этом толщина покрытий составляет 21–31 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенного влияния на скорость износа.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, износостойкость, шероховатость, морфология, электролит

Для цитирования: Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 27–33. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33>

Structure and Properties of Black Ceramic MAO Coatings on Aluminum Alloys

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The existing processes for obtaining black wear-resistant coatings include chemical methods, anodic oxidation followed by painting in aniline dyes, electrochemical deposition, vacuum plasma treatment, microarc oxidation (MAO). Of great interest for the formation of light-absorbing coatings is the MAO method, which is characterized as a reliable and environmentally friendly process, which provides the formation of a hard ceramic-like oxide layer with high corrosion resistance

Адрес для переписки

Будницкий Алексей Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

Address for correspondence

Budnitskiy Alexey S.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

and good adhesion to the substrate. Therefore, the development of methods for obtaining high-quality black MAO coatings with both high optical and mechanical characteristics is currently an urgent task. The paper presents the results of a study of the structure and properties of black ceramic coatings on aluminum alloy AMg₂ obtained by microarc oxidation using silicate-alkaline and silicate-phosphate electrolytes containing potassium ferrocyanide and sodium tungstate as coloring components. Sodium tungsten acid and potassium ferrocyanide with a concentration of 0.5 to 2.0 g/l were added to the electrolytes as additional components that ensured the coloring of the coatings. It has been established that the most saturated black coatings in a silicate-alkaline electrolyte are formed with the addition of 1.5–2.0 g/l of sodium tungstate, and in a silicate-phosphate electrolyte with the addition of 1.5 g/l of potassium ferrocyanide. The use of an electrolyte containing sodium tungstate makes it possible to form coatings with a lower microroughness height (R_a 0.97–1.11 μm) compared to coatings obtained in an electrolyte containing potassium ferrocyanide (R_a up to 4.20 μm). The maximum wear resistance of the resulting coatings (wear rate $(0.38\text{--}0.59) \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{m}\cdot\text{N})$) is achieved by treatment in the studied electrolytes with a duration of 10 min. In this case, the thickness of the coatings is 21–31 μm . A further increase in the duration of processing does not have a significant effect on the wear rate.

Keywords: microarc oxidation, wear resistance, roughness, morphology, electrolyte

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Budnitskiy A. S. (2023) Structure and Properties of Black Ceramic MAO Coatings on Aluminum Alloys. *Science and Technique*. 22 (1), 27–33. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33> (in Russian)

Введение

В современной промышленности широко используются процессы модифицирования поверхности алюминиевых сплавов, что позволяет значительно повысить их эксплуатационные характеристики и расширить область применения. В дополнение к высокой удельной прочности, хорошей тепло- и электропроводности [1–3] модифицирование алюминия позволяет существенно улучшить такие характеристики, как износостойкость, твердость, коррозионная стойкость, трибологические, изоляционные и оптические свойства.

Одной из задач современной промышленности является разработка процессов формирования черных износостойких покрытий, обеспечивающих поглощение света. Такие покрытия применяются в оптических приборах, электронно-оптических системах, микроэлектронике, устройствах оптической обработки информации, при изготовлении приемников излучения и преобразователей, в вакуумной технике, в преобразователях солнечной энергии, тепловых излучателях. Например, для устранения боковых помех оптико-электронных приборов видимого диапазона в оптическом приборостроении используются специальные светозащитные бленды, на внутреннюю поверхность которых наносятся черные покрытия, обеспечивающие снижение яркости рассеянного света до значения меньше яркости фоновых помех [1].

Существующие процессы получения черных износостойких покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Большой интерес для формирования черных по-

крытий представляет метод МДО, характеризующийся как надежный и экологически безопасный процесс [4–6], обеспечивающий формирование твердого керамикоподобного оксидного слоя с высокой коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к основе.

Структура и свойства формируемых МДО-покрытий определяются как электрическими параметрами (плотностью тока [7–9], напряжением [10, 11], коэффициентом заполнения [12] и частотой [13]), так и составом электролитов [14–17], обеспечивающим в зоне обработки необходимую электрохимическую реакцию для получения покрытия в соответствии с его функциональным назначением. Недостатки метода МДО при получении черных покрытий – низкие оптические характеристики и сложность формирования качественных покрытий на внутренних поверхностях длинномерных изделий [8, 9]. Поэтому разработка методов получения качественных черных МДО-покрытий, обладающих высокими оптическими и механическими характеристиками, является в настоящее время актуальной задачей.

Цель исследований авторов – изучение процессов формирования черных керамических покрытий методом МДО с установлением влияния составов электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия, и режимов обработки на структуру и свойства покрытий (износостойкость, морфологию, шероховатость, толщину). Полученные результаты позволили установить наиболее эффективные режимы, обеспечивающие формирование качественных покрытий с высокой износостойкостью при относительно небольшой продолжительности обработки.

Оборудование и методы

Для нанесения черных керамических покрытий использовали плоские образцы из алюминиевого сплава АМг2 размерами 25×25×1,2 мм. При обработке образцов применяли электролиты двух составов. Основа – гидроксид натрия, натрий фосфорнокислый и силикат натрия. В качестве дополнительных компонентов, обеспечивающих окрашивание покрытий, в электролиты добавляли вольфрамвоокисный натрий и ферроцианид калия концентрацией от 0,5 до 2,0 г/л. Составы применяемых электролитов приведены в табл. 1. Температура электролитов при обработке образцов поддерживалась в диапазоне 20–25 °С.

Таблица 1

Составы применяемых электролитов
Compositions of the used electrolytes

Электролит	Состав электролита
Силикатно-щелочной с вольфраматом натрия (SAT)	2 г/л NaOH + 10 г/л Na ₂ SiO ₃ + 0,5–2,0 г/л Na ₂ WO ₄
Силикатно-фосфатный с ферроцианидом калия (SPF)	10 г/л Na ₂ HPO ₄ + 10 г/л Na ₂ SiO ₃ + (0,5 – 2,0) г/л K ₄ [Fe(CN) ₆]

Обработку образцов выполняли в биполярном режиме МДО с амплитудой положительного +(450–500) В и отрицательного –(70–100) В напряжений. Частота импульсов при обработке составляла 200–1000 Гц (рис. 1).

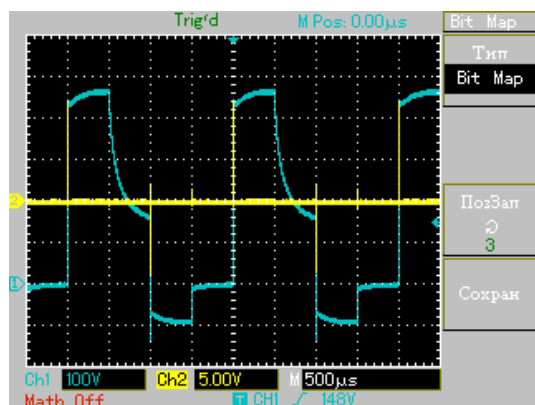


Рис. 1. Пример осциллограммы напряжения и тока при микродуговом оксидировании исследуемых образцов при частоте 500 Гц

Fig. 1. Example of voltage and current oscillogram during microarc oxidation of test samples at a frequency of 500 Hz

Измерение толщины покрытий выполняли на их поперечных шлифах покрытий с помощью металлографического микроскопа Altamі MET 1. Шероховатость поверхности образцов измеряли профилометром MarSurf PS1.

Микрофотографии поверхности образцов получали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU.

Исследование износостойкости покрытий выполняли на трибометре FT3 по схеме с вращающимся индентором. В качестве индентора использовали шар из нитрида кремния диаметром 6 мм. Индентор неподвижно закрепляли в торце полого стержня, а перпендикулярно стержню в специальном держателе устанавливали образец. При испытании движение совершал индентор, передавая заданную нагрузку образцу, который оставался неподвижным в держателе. Эксперименты проводили при следующих параметрах: нагрузка на образец 10 Н, скорость прохода 50 мм/с, радиус канавки износа относительно оси вращения 8 мм, расстояние 200 м. Скорость износа рассчитывали по формуле

$$v = \frac{2\pi RS}{Pl},$$

где S – площадь поперечного сечения канавки износа, мм²; l – дистанция, пройденная индентором, м; R – радиус канавки износа относительно оси вращения, мм; P – нагрузка на образец, Н.

Результаты исследований и их обсуждение

Визуальная оценка полученных образцов показала, что в электролите SAT равномерное наиболее насыщенное черное покрытие формируется при концентрации вольфрамата натрия 1,5–2,0 г/л. При меньшей концентрации наблюдается образование ненасыщенного покрытия с цветом, близким к оливковому. При использовании электролита SPF однородное наиболее насыщенное покрытие формируется при содержании ферроцианида калия 1,5 г/л. Внешний вид образцов после МДО продолжительностью 10 мин при содержании в электролитах дополнительных компонентов 1,5 г/л представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образцов с полученными черными керамическими покрытиями в электролитах: слева – SAT; справа – SPF

Fig. 2. Appearance of samples with obtained black ceramic coatings in electrolytes: left – SAT; right – SPF

При МДО в электролите SAT концентрация вольфрамата натрия не оказывает существенно влияния на качество формируемых покрытий (рис. 3).

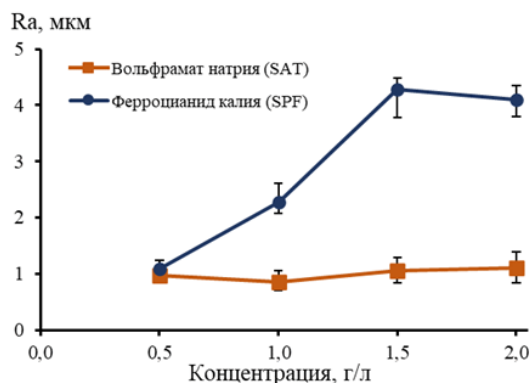


Рис. 3. Влияние концентрации окрашивающих компонентов электролитов SAT и SPF на шероховатость формируемых черных керамических покрытий

Fig. 3. Influence of the concentration of coloring components of SAT and SPF electrolytes on the roughness of formed black ceramic coatings

Так, повышение концентрации вольфрамата натрия с 0,5 до 2,0 г/л при обработке продолжительностью 10 мин приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra с 0,97 до 1,11 мкм. В случае использования электролита SPF с увеличением содержания ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л наблюдается значительное ухудшение качества формируемых покрытий. Дальнейшее повышение концентрации ферроцианида калия не оказывает влияния на изменение шероховатости (рис. 3). Так, рост концентрации ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra с 1,08 до 4,20 мкм. Характер представленных зависимостей может быть связан с высокой проводимостью ферроцианида калия. Повышение концентрации этого компонента вызывает увеличение плотности тока и соответственно рост энергии дуговых разрядов и повышение

температуры в зоне пробоя. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объема расплавленного материала, выделяющегося на границе покрытие – основание, и образованию более развитой и рельефной поверхности, что является причиной значительного повышения шероховатости.

Существенное изменение рельефа с увеличением концентрации ферроцианида калия подтверждается также электронными фотографиями, представленными на рис. 4. Морфология формируемых черных покрытий зависит от состава применяемого электролита. При этом значительное влияние на морфологию оказывает концентрация дополнительных компонентов, необходимых для окрашивания покрытия (вольфрамата натрия и ферроцианида калия). На рис. 4, 5 представлены электронные фотографии поверхности образцов после МДО продолжительностью 10 мин в электролитах SAT и SPF при концентрации дополнительных компонентов от 0,5 до 2,0 г/л. При окислировании в электролите SAT происходит формирование покрытия, имеющего выраженную кратерную структуру с большим количеством пор (рис. 4). Внешний вид кратеров типичен для МДО, когда расплавленный субстрат выбрасывается с поверхности раздела подложка – покрытие через разрядные каналы, затем окисляется, затвердевает и образует кратеры. С увеличением концентрации вольфрамата натрия размеры пор незначительно уменьшаются, а рельеф кратеров увеличивается.

При обработке в электролите SPF формируются покрытия с глобулярной структурой с большим количеством пор, имеющих преимущественно размеры 0,5–3,2 мкм (рис. 5).

Повышение содержания ферроцианида калия приводит к уплотнению структуры покрытий со значительным увеличением плотности и размеров глобулярных образований.

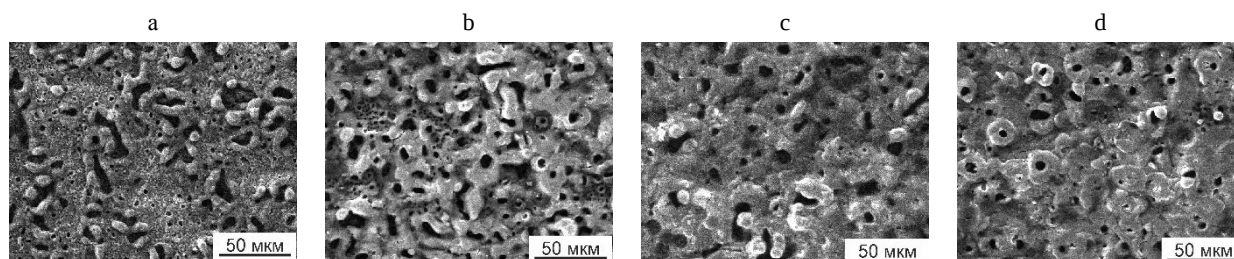


Рис. 4. Морфология покрытия после обработки в электролите SAT с различной концентрацией вольфрамата натрия, г/л: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5; д – 2,0

Fig. 4. Morphology of the coating after treatment in SAT electrolyte with different concentrations of sodium tungstate, g/l: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5; д – 2,0

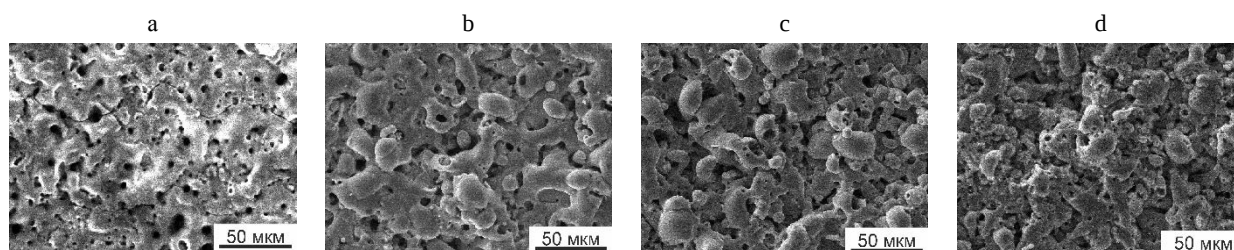


Рис. 5. Морфология покрытия после обработки в электролите SPF с различной концентрацией ферроцианида калия, г/л: а – 0,5; б – 1,0; в – 1,5; д – 2,0

Fig. 5. Coating morphology after treatment in SPF electrolyte with different concentrations of potassium ferrocyanide, g/l: a – 0.5; b – 1.0; c – 1.5; d – 2.0

На рис. 6 представлена зависимость, характеризующая динамику роста толщины покрытий с увеличением продолжительности МДО для образцов, полученных в электролитах SAT и SPF с содержанием по 1,5 г/л вольфрамата натрия и ферроцианида калия соответственно.

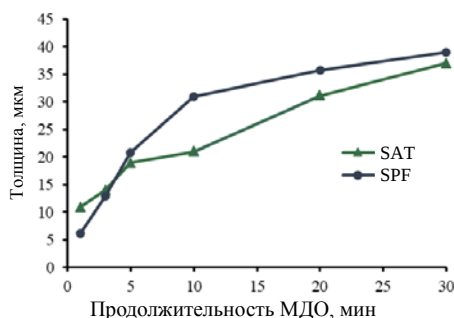


Рис. 6. Влияние продолжительности микродугового оксидирования на толщину формируемых покрытий

Fig. 6. Influence of MAO duration on the thickness of formed coatings

Так, в начальной стадии обработки (1 мин) толщина покрытий составляла 6–11 мкм, а после обработки продолжительностью 30 мин – 37–39 мкм. Наиболее интенсивный рост толщины формируемых покрытий для образцов, полученных в использованных электролитах, наблюдался при продолжительности обработки

до 5 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки приводило к замедлению роста толщины.

Структуры сформированных покрытий в результате МДО продолжительностью 10 мин представлены на рис. 7. Покрытие, полученное с применением электролита SAT, имеет толщину 21 мкм (рис. 7а) и состоит из плотного внутреннего (толщиной 3,2–5,0 мкм) и пористого наружного слоев. Наружный слой представляет собой пористую структуру с большим количеством микротрещин. В нем преобладают продольные поры длиной до 13 мкм и крупные сферические поры размерами 2,0–4,8 мкм. Кроме того, особенностью покрытия в электролите SAT является наличие глубоких открытых пор, выходящих на поверхность. Применение SPF позволило получить оксидный слой с общей толщиной 31 мкм (рис. 7б) со значительно меньшим количеством микротрещин по сравнению с покрытием, полученным в электролите SAT, и с относительно небольшим беспористым внутренним слоем (1,5–2,5 мкм).

Наружный слой имеет как продольные, так и поперечные (причем закрытые) поры размером до 18 мкм. При этом в структуре наружного слоя присутствует большое количество мелких сферических пор размерами 0,5–2,5 мкм.

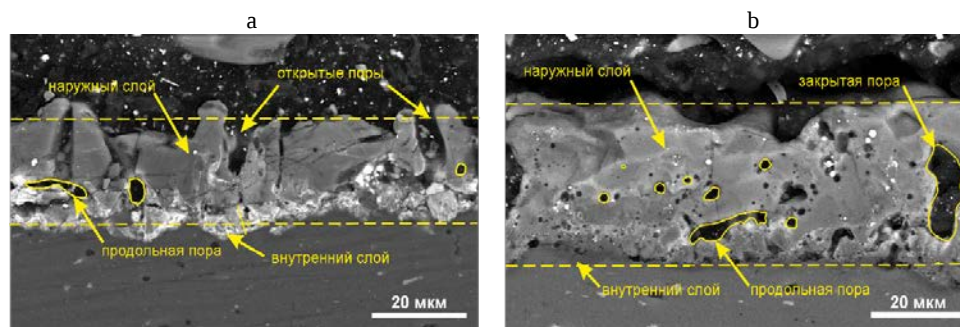


Рис. 7. Структуры покрытий, сформированных с применением электролитов SAT (а) и SPF (б)

Fig. 7. Structures of coatings formed using SAT (a) and SPF (b) electrolytes

На рис. 8 представлены зависимости, характеризующие влияние продолжительности обработки на скорость износа поверхности образцов. Графики для образцов, полученных в электролитах SAT и SPF, имеют сходный характер и близкие значения. На начальной стадии обработки (1 мин) покрытия демонстрировали низкую стойкость к износу. Из-за малой толщины покрытия продавливались в подложку или полностью изнашивались с дальнейшим износом подложки на относительно большую глубину (24–26 мкм), что соответствует скорости износа $(3,0\text{--}3,4) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м} \cdot \text{Н})$. Максимальная износостойкость покрытий (скорость износа $(0,38\text{--}0,59) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м} \cdot \text{Н})$) была достигнута при обработке продолжительностью 10 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки существенным образом не оказало влияния на скорость износа.

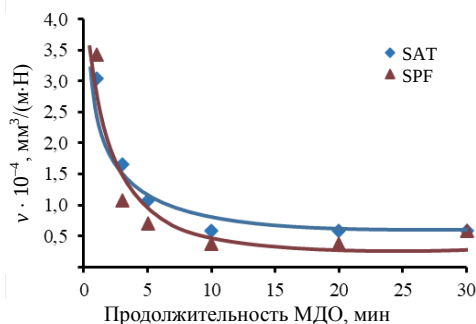


Рис. 8. Влияние продолжительности микродугового оксидирования на скорость износа поверхности образцов

Fig. 8. Effect of MAO duration on the wear rate of the sample surface

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы получения черных керамических покрытий на алюминиевом сплаве АМг₂ с помощью микродугового оксидирования с применением силикатно-щелочного и силикатно-фосфатного электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия. Установлено, что наиболее насыщенные черные покрытия в силикатно-щелочном электролите формируются при добавлении 1,5–2,0 г/л вольфрамата натрия, а в силикатно-фосфатном — при добавлении 1,5 г/л ферроцианида калия.

2. Применение электролита, содержащего вольфрамат натрия, позволяет сформировать покрытия с меньшей высотой микронеровностей (R_a 0,97–1,11 мкм) по сравнению с покрытиями, полученными в электролите, содержащем ферроцианид калия (R_a до 4,20 мкм).

3. Максимальная износостойкость полученных покрытий (скорость износа $(0,38\text{--}0,59) \times 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м} \cdot \text{Н})$) достигается при обработке в исследованных электролитах продолжительностью 10 мин. При этом толщина покрытий составляет 21–31 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенного влияния на скорость износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium and its Alloys: Mechanism, Properties and Applications / G. B. Darband [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. 2017. Vol. 5, No 1. P. 74–132. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004>.
2. Influence of Zinc-Dipping on Electroless Nickel Coating on Magnesium Alloy / X. Guan [et al.] // Surface Engineering. 2019. Vol. 35, No 10. P. 906–912. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1548101>.
3. Calcium Doped Flash-PEO Coatings for Corrosion Protection of Mg Alloy / E. Wierzbicka [et al.] // Metals. 2020. Vol. 10, No 7. P. 916. <https://doi.org/10.3390/met10070916>.
4. Ali, M. Magnesium-Based Composites and Alloys for Medical Applications: a Review of Mechanical and Corrosion Properties / M. Ali, M. Hussein, N. Al-Aqeeli // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 792. P. 1162–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.080>.
5. Advance in Antibacterial Magnesium Alloys and Surface Coatings on Magnesium Alloys: a Review / Y. Shao [et al.] // Acta Metallurgica Sinica. 2020. Vol. 33. P. 615–629. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01044-w>.
6. Pulsed Plasma Electrolytic Oxidation Processes for Aeronautical Applications and Their Technical Application / N. Godja [et al.] // Transactions of the IMF. 2013. Vol. 91, No 6. P. 321–329. <https://doi.org/10.1179/0020296713z.000000000150>.
7. Effect of Pulse Current Mode on Microstructure, Composition and Corrosion Performance of the Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation on AZ31 Mg Alloy / M. Rahmati [et al.] // Coatings. 2019. Vol. 9, No 10. 688 p. <https://doi.org/10.3390/coatings9100688>.
8. Effects of Pulse Current Mode on Plasma Electrolytic Oxidation of 7075 Al in KMnO₄ Containing Solution / R. Aliramezani [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. 2017. Vol. 164, No 12. P. C690–C698. <https://doi.org/10.1149/2.0021713jes>.
9. Mann, R. Effects of Pulsed Current on Plasma Electrolytic Oxidation / R. Mann, W. E. G. Hansal, S. E. Hansal // Transactions of the IMF. 2014. Vol. 92, No 6. P. 297–304. <https://doi.org/10.1179/0020296714z.000000000206>.
10. Liu, S. Effects of Negative Voltage on Microstructure and Corrosion Resistance of Red Mud Plasma Electrolytic Oxidation Coatings / S. Liu, J. E. Zeng // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 352. P. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.080>.
11. Mechanical and Tribological Properties of Ca/P-Doped Titanium Dioxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation: Effects of Applied Voltage and Heat Treatment / C. A. H. Laurindo [et al.] // Tribology Transactions. 2018. Vol. 61, No 4. P. 733–741. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1404176>.

12. Effect of Duty Cycle and Treatment Time on Electrolytic Plasma Oxidation of Commercially Pure Al Samples / M. D. M. Tavares [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, No 2. P. 2141–2147. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.020>.
13. Effects of Duty Cycle, Current Frequency, and Current Density on Corrosion Behavior of the Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 6061 Al Alloy in Artificial Seawater / M. Vakili-Azghandi, A. Fattah-Alhosseini // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48. P. 4681–4692. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4205-8>.
14. Microstructure, Formation Mechanism and Antifouling Property of Multi-Layered Cu-Incorporated Al_2O_3 Coating Fabricated Through Plasma Electrolytic Oxidation / X. Zhang [et al.] // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No 3. P. 2901–2909. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.284>.
15. Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties / Q. Chen [et al.] // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 423. P. 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.202>.
16. Hsu, C.-H. Effects of Addition of $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ to Electrolytes on Alumina Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation / C.-H. Hsu, H.-P. Teng, F. Lu // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 205, No 12. P. 3677–3682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.024>.
17. Effect of $(\text{NaPO}_3)_6$ Concentrations on Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ91D Magnesium Alloy / H. Luo [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 464, No 1–2. P. 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.
- Application. *Transactions of the IMF*, 91 (6), 321–329. <https://doi.org/10.1179/0020296713z.000000000150>.
7. Rahmati M., Raeissi K., Toroghinejad M. R., Hakimizad A., Santamaria M. (2019) Effect of Pulse Current Mode on Microstructure, Composition and Corrosion Performance of the Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation on AZ31 Mg Alloy. *Coatings*, 9 (10), 688. <https://doi.org/10.3390/coatings9100688>.
8. Aliramezani R., Raeissi K., Santamaria M., Hakimizad A. (2017) Effects of Pulse Current Mode on Plasma Electrolytic Oxidation of 7075 Al in KMnO_4 Containing Solution. *Journal of The Electrochemical Society*, 164 (12), C690–C698. <https://doi.org/10.1149/2.0021713jes>.
9. Mann R., Hansal W. E. G., Hansal S. E. (2014) Effects of Pulsed Current on Plasma Electrolytic Oxidation. *Transactions of the IMF*, 92 (6), 297–304. <https://doi.org/10.1179/0020296714z.000000000206>.
10. Liu S., Zeng J. E. (2018) Effects of Negative Voltage on Microstructure and Corrosion Resistance of Red Mud Plasma Electrolytic Oxidation Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 352, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.080>.
11. Laurindo C. A. H., Lepienski C. M., Amorim F. L., Torres R. D., Soares P. (2018) Mechanical and Tribological Properties of Ca/P-Doped Titanium Dioxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation: Effects of Applied Voltage and Heat Treatment. *Tribology Transactions*, 61 (4), 733–741. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1404176>.
12. Tavares M. D. M., Vitoriano J. O., da Silva R. C. L., Franco A. R., de Souza G. B., da Costa J. A. P., Clodomiro Alves-Junior (2019) Effect of Duty Cycle and Treatment Time on Electrolytic Plasma Oxidation of Commercially Pure Al Samples. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2), 2141–2147. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.020>.
13. Vakili-Azghandi M., Fattah-Alhosseini A. (2017) Effects of Duty Cycle, Current Frequency, and Current Density on Corrosion Behavior of the Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 6061 Al Alloy in Artificial Seawater. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4681–4692. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4205-8>.
14. Zhang X., Wu Y., Wang J., Xia X., Lv Y., Cai G., Liu H., Xiao J., Liu B., Dong Z. (2020) Microstructure, Formation Mechanism and Antifouling Property of Multi-Layered Cu-Incorporated Al_2O_3 Coating Fabricated Through Plasma Electrolytic Oxidation. *Ceramics International*, 46 (3), 2901–2909. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.284>.
15. Chen Q., Jiang Z., Tang S., Dong W., Tong Q., Li W. (2017) Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties. *Applied Surface Science*, 423, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.202>.
16. Hsu C.-H., Teng H.-P., Lu F. (2011) Effects of Addition of $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ to Electrolytes on Alumina Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 205 (12), 3677–3682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.024>.
17. Luo H., Cai Q., Wei B., Yu B., Li D., He J., Liu Z. (2008) Effect of $(\text{NaPO}_3)_6$ Concentrations on Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 464 (1–2), 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.

Поступила 30.08.2022

Подписана в печать 01.11.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Darband G.B., Aliofkhaezrai M., Hamghalam P., Valizade N. (2017) Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium and its Alloys: Mechanism, Properties and Applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5 (1), 74–132. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004>.
2. Guan X., Zhu H., Shi J., Wei S., Shao Z., Shen X. (2019) Influence of Zinc-Dipping on Electroless Nickel Coating on Magnesium Alloy. *Surface Engineering*, 35 (10), 906–912. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1548101>.
3. Wierzbicka E., Pillado B., Mohedano M., Arrabal R., Matykina E. (2020) Calcium Doped Flash-PEO Coatings for Corrosion Protection of Mg Alloy. *Metals*, 10 (7), 916. <https://doi.org/10.3390/met10070916>.
4. Ali M., Hussein M., Al-Aqeeli N. (2019) Magnesium-Based Composites and Alloys for Medical Applications: a Review of Mechanical and Corrosion Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1162–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.080>.
5. Shao Y., Zeng R.-C., Li S.-Q., Cui L.-Y., Zou Y.-H., Guan S.-K., Zheng Y.-F. (2020) Advance in Antibacterial Magnesium Alloys and Surface Coatings on Magnesium Alloys: a Review. *Acta Metallurgica Sinica*, 33, 615–629. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01044-w>.
6. Godja N., Hansal W. E. G., Mann R., Kleber Ch., Hansal S. (2013) Pulsed Plasma Electrolytic Oxidation Processes for Aeronautical Applications and Their Technical

Received: 30.08.2022

Accepted: 01.11.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-34-41>

UDC 625.8

Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure

Zhang Qing^{1, 2)}, V. N. Romaniuk³⁾, B. M. Khroustalev³⁾, Hou Qiang^{1, 2)}, Hou Dehua^{1, 2)}

¹⁾Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd. (Henan, People's Republic of China),

²⁾Henan Key Laboratory of High Grade Highway Detection and Maintenance Technology (Henan, People's Republic of China),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. The relevance of solving the problem of energy saving, today, is enhanced by the requirements of an environmental nature, united by the term "green energy". Solving the problems of climate conservation is inseparable from solving the problem of energy saving. Green, hydrogen energy, about which there has been a powerful and aggressive debate over the past decade, turned out to be directions far from solving the problems of both energy saving and environmental protection. The solution of both problems of energy saving and environmental protection at the present time and in the foreseeable future is being solved on the basis of the use of traditional primary energy resources, primarily natural gas. In this regard, the need to solve the problem of quantifying the thermodynamic perfection of heat-technological process for producing an asphalt concrete mixture becomes extremely relevant. This assessment is most simply carried out on the basis of the exergy method of thermodynamic analysis with the determination of the exergy structure of the asphalt concrete mixture flow, including thermomechanical, concentration and reaction components. The value of the concentration component of the exergy of the asphalt concrete mixture allows us to assess the energy efficiency of its production at asphalt concrete plants based on the modern exergy method of thermodynamic analysis; gives a quantitative estimate of the energy consumption for the process of mixing the ingredients of the asphalt concrete mixture in the mixing unit of asphalt concrete plants. The paper defines the structure of the exergy of the asphalt concrete mixture, in which the transit reaction component dominates, which determines the specificity of the exergy of the asphalt concrete mixture. The value of the specific mass concentration component of the exergy of the asphalt concrete mixture in comparison with the thermal component is small and the error in determining the concentration component, which cannot be objectively eliminated, does not affect the results of thermodynamic analysis.

Keywords: asphalt concrete mixture, thermodynamic analysis, exergy method, exergy, exergy structure, asphalt concrete pavement

For citation: Zhang Qing, Romaniuk V. N., Khroustalev B. M., Hou Qiang, Hou Dehua (2023) Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure. *Science and Technique*. 22 (1), 34–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-34-41>

Термодинамическая оценка свойств и энергозатрат смешения асфальтобетона по структуре эксергии

Чжан Цин^{1, 2)}, В. Н. Романиук³⁾, Б. М. Хрусталеv³⁾, Хоу Цян^{1, 2)}, Хоу Дэхуа^{1, 2)}

¹⁾Хэнаньская компания «Гаююань» по технологическому обслуживанию автомагистралей (Хэнань, Китайская Народная Республика),

²⁾Хэнаньская ключевая лаборатория высококачественных технологий по диагностике и обслуживанию автомагистралей (Хэнань, Китайская Народная Республика),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Актуальность энергосбережения в наши дни усиливается требованиями экологического характера, объединенными термином «зеленая энергетика», а сохранение климата неотделимо от проблемы энергосбережения. Такие

Адрес для переписки

Романиук Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

направления, как зеленая, водородная энергетика, о которых мощно и агрессивно велись дебаты в последнее десятилетие, оказались далекими от решения задач и энергосбережения, и защиты окружающей среды. В настоящее время и в обозримом будущем доминирующим остается использование традиционных первичных энергоресурсов, прежде всего природного газа. В этой связи чрезвычайно важна количественная оценка термодинамического совершенства теплотехнологического процесса получения асфальтобетонной смеси. Наиболее просто ее провести на базе эксергетического метода термодинамического анализа с определением структуры эксергии потока асфальтобетонной смеси, включающей термомеханическую, концентрационную и реакционную составляющие. Значение концентрационной составляющей эксергии асфальтобетонной смеси позволяет проводить оценку энергетической эффективности ее производства на асфальтобетонных заводах на базе современного эксергетического метода термодинамического анализа; дает количественную оценку затрат энергии на проведение процесса смешения ингредиентов асфальтобетонной смеси в смесительном агрегате. В статье определена структура эксергии асфальтобетонной смеси, в которой доминирует транзитная реакционная составляющая. Значение удельной массовой концентрационной составляющей эксергии асфальтобетонной смеси в сравнении с термической составляющей невелико, и погрешность в определении концентрационной составляющей, которая объективно не может быть устранена, не влияет на результаты термодинамического анализа.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, термодинамический анализ, эксергетический метод, эксергия, структура эксергии, асфальтобетонное покрытие

Для цитирования: Термодинамическая оценка свойств и энергозатрат смешения асфальтобетона по структуре эксергии / Чжан Цин [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 1. С. 34–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-34-41>

Introduction

The materials of the paper are a continuation of research on the use of the exergy method of thermodynamic analysis [1], aimed at creating a scientific and information environment necessary for in-depth studies on heat- and mass transfer, aimed at improving the quality, efficiency and environmental friendliness of hard road surfaces with the use of various asphalt concrete materials (ACM). With the help of exergy, as it is known, it is possible to assess the thermodynamic efficiency of the heat technology for obtaining ACM. The formation and assessment of the state of the road surface based on the thermodynamic theory of the life cycle of the asphalt concrete road surface from design to repair [2–6] can be used to calculate the duration of the operational, overhaul period of the road surface. This, in turn, reduces the environmental impact of the entire repair complex by reducing the frequency of these works. In the same context of reducing the environmental load from the creation of road asphalt concrete pavement, it is necessary to substantiate the possibility of involving waste asphalt concrete in the re-use of materials based on an assessment of changes in the concentration component of ACM exergy [7, 8]. The above emphasizes the relevance of an objective quantitative determination of the assessment of thermodynamic efficiency of both ACM heat technology in general and its constituent stages, in particular. The mentioned concentration component of the exergy of the asphalt concrete mix $E_{k, ACM}$ determines the energy minimum cost

of an ideal mixer, the value of which is necessary for an objective assessment of the operation of the mixer in terms of its energy consumption [9]. The promotion of the processes of creating asphalt concrete pavement towards the so-called “green energy”, among other things, stipulates for the involvement in the re-use of the used pavement. The possibility of such use of materials while maintaining the ACM quality can be assessed by changing the concentration component of the ACM exergy, which does not depend on the temperature of the mixture, and of course, on the temperature of the paving. Strength, life cycle of asphalt concrete pavement both during hot laying and during laying at normal temperature is associated with the concentration component of exergy, determined by the fineness of the mineral materials that make up the ACM, the porosity of the layer and the energy of their adhesive interaction with the ACM bituminous binder. In this context, it seems very useful to consider the determining factors on which the indicated concentration component $E_{k, ACM}$ depends.

Determining factors of the exergy concentration component of the asphalt concrete mixture

The factors that determine the value of $E_{k, ACM}$ of asphalt concrete materials include: specific energy of adhesive interaction; specific surface of mineral materials; content and ratio of structured (oriented) and bulk bitumen in ACM.

It has been shown in [1] that when ACM is obtained in a mixer, the energy costs for its operation

must exceed the concentration component of the ACM exergy. This final process of obtaining ACM completes the formation of its structure, which is characterized by wetting and enveloping with a bituminous binder of mineral materials (MM), during which the physicochemical properties of these interacting materials are manifested: wetting, enveloping, sorption by the surface of some mineral active components of the bituminous binder. From this physical model, it follows that active structure formation during the interaction of mineral with bituminous binder is a dependent, secondary factor determined by the ratio of the power of the energy flow supplied to the mixer, the value of $E_{k, ACM}$ of asphalt concrete materials and the internal irreversibility of the process, carried out in the mixer. The mentioned irreversibility in the volume of the mixer is determined by the values of external and internal friction of the ACM constituent components. From this it follows: in accordance with the specific set of ACM components and the design of the mixers, it is necessary to determine the exposure time to ensure the required energy supply for proper mixing. Ignoring the need to overcome the value of the minimum energy impact during mixing leads to erroneous results of experimental studies on the effect of additives introduced into the ACM composition on the quality of asphalt concrete.

Thus, the value of the concentration component $E_{k, ACM}$ is one way or another connected with the achievement of the quality of ACM and the possibility of obtaining a quantitative estimate of the energy consumption for the mixing process in the case of carrying out thermodynamic analysis at the level of exergy assessments.

Ensuring the energy potential of the adhesive interaction of the bituminous binder with the mineral components of ACM is the main task of mixing in the mixer, and the concentration component of the exergy makes it possible to obtain a quantitative assessment of this process.

In [4], an analytical dependence is given, which allows determining the energy of adhesive interaction with some mineral materials (granite, quartzite, marble, limestone) for road bitumen, J/m^2 :

$$W_{adh} = \sigma_{liq.-gas} (1 + \cos \theta), \quad (1)$$

where $\sigma_{liq.-gas}$ – bitumen surface tension, $N \cdot m$; θ – wetting angle of bitumen with one or another MM.

Table 1 shows the results of determining the work of adhesion for the listed MM and road bitumen.

Table 1
Energy of adhesive interaction of bitumen with the surface of stone materials

Bitumen brand	Value of adhesive interaction energy, J/m^2		
	Quartzite	Granite	Marble
БНД [BND] 60/90	0.06367	0.05977	0.0659
БНД [BND] 90/130	0.05982	0.05548	0.061
БНД [BND] 130/200	0.05424	0.05055	0.0555
БНД [BND] 200/300	0.053	0.053	0.054

The amplitude of change in the adhesive interaction energy, according to Tab. 1, is about 10 %, which allows us to consider the work of the adhesive interaction of the bituminous binder and MM at the level of 0.06 kJ/m^2 . The error in determining $E_{k, ACM}$ of asphalt concrete materials in connection with the proposed averaging is quite acceptable.

The size of the surface of MM particles significantly determines the properties of ACM and, it should be noted, has not been sufficiently studied. A very complete analysis of works on finding the specific surface area of MM is given in [10, 11].

The mineral materials included in the ACM differ from each other in particle sizes hundreds and thousands of times: for cubic shape of particles with a density $\rho = 2.65 \text{ t/m}^3$, the surface increases from $15.8 \cdot 10^2$ to $15.8 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{t}$. The edges of the cube have dimensions from 10 mm to $0.1 \mu\text{m}$, respectively.

In [10] it is stated that “the surface and volume of the grain are expressed through the average size of the sieve opening d , defined as the arithmetic mean of the larger D and smaller d sieve openings that sifted out this fraction, with which the surface and volume of one grain are associated. It is known from granulometric analysis that this transition is sufficiently acceptable only with a normal size distribution of MM fractions. The deviation of the real distribution is another source of error in determining the specific surface area of MM”. To calculate the specific area of a disperse system

represented by MM, the following relations are used [10]:

$$S = \alpha d^2, \text{ m}^2, \quad (2)$$

$$V = \beta d^3, \text{ m}^3, \quad (3)$$

where α – surface factor; d – average sieve opening size, m; β – form factor.

The work [10] notes a variety of approaches to determining the surface of MM used, for example, in France, Switzerland and Poland. The following dependencies are offered in France (4)–(6):

$$s_j = \frac{6g_j}{\rho_j \sqrt{d_j D_j}}, \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (4)$$

where g_j – mass fraction of the j -fraction in the mixture, %; ρ_j – material density of the j -th fraction, kg/m³; d_j, D_j – smallest and largest sieve opening diameter, mm.

For the entire mixture, it is required to sum the specific surfaces of all n fractions of the mixture [5]

$$s_{cm} = \sum_{j=1}^n s_j, \text{ m}^2/\text{kg}. \quad (5)$$

The French method for calculating the MM surface also uses the dependence [10]

$$s_{cm} = (0.25g_1 + 2.3g_2 + 12g_3 + 135g_4)10^{-2}, \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (6)$$

where g_1 – content of crushed stone larger than 5 mm in the mixture, %; g_2 – sand content of fractional composition from 5 to 0.315 mm, %; g_3 – content of sand with particle sizes from 0.08 to 0.315 mm in the mixture, %; g_4 – content of mineral powder with particle sizes less than 0.08 mm, %.

In Switzerland, to calculate the MM surface, it is proposed to use [10]

$$s_{cm} = \frac{2K}{\rho} \sum_{j=1}^n \frac{2g_j}{d_j + D_j}, \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (7)$$

where $K = 3, 4, 5$ – respectively for grains rounded, with faces twice broken and with faces once broken.

In Poland, to calculate the surface of the MM mixture, the dependencies are used

$$s_{cm} = (127g_1 + 15.25g_2 + 3.17g_3 + 0.62g_4 + 0.13g_5) \cdot 10^{-2}, \text{ m}^2/\text{kg}, \quad (8)$$

where g_1 – content of particles less than 74 μm in the mixture, %; g_2 – the same for the interval 74–297 μm , %; g_3 – 297–2000 μm , %; g_4 – 2000–8000 μm , %; g_5 – larger than 8 mm.

Table 2 shows the calculation results of the above calculation methods.

Table 2
Specific surface area of mineral materials included in the asphalt concrete materials, determined by the ratios of different countries in Europe [10]

Fraction size, μm	Fraction content in mixture, %	Specific surface area, m^2/kg			
		France	Poland	Switzerland	
				$K = 3$	$K = 5$
590–297	42.80	2.31	1.36	2.18	3.64
297–147	53.70	5.82	8.68	5.48	9.10
147–74	3.20	0.70	–	0.66	1.09
74–5	0.30	0.34	0.38	0.17	2.28
Total	100.00	9.17	10.42	8.49	16.11

The error of the data in the Table is from 50 to 100 %, which is unacceptable and this indicates the feasibility of using experimental methods for determining MM surfaces using the relationship between the porosity and aerodynamic resistance of the blown fixed MM layer and the diameter of the grains that make up the layer, using the law Darcy, for calculating the aerodynamic drag of the channel. As a result, the dependence is used to determine the surface of the layer material

$$s = 14 \sqrt{\frac{1}{Kv} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon^2}}, \text{ m}^2, \quad (9)$$

where ε – layer porosity; v – viscosity of the medium blown through the layer, Pa·s; K – filtration coefficient, cm/s; s – specific volumetric surface area of MM layer, cm^{-1} .

A method for finding the surface of a polydisperse MM layer, which uses the enveloping of grains with an oil film, is more reliable. 100 g of a dry mixture with a known granulometric composition is placed in a tissue vessel and 40 cm³ of machine oil is poured for one minute. Then we

centrifuge for 4 min to remove excess oil. To determine the mass of oil remaining on the surface of the particles of the MM mixture of each mineral fraction, the particles of which are wetted with oil, one more weighing is carried out and the desired result is obtained by the difference in weights after and before the above manipulations. Next, for a MM with a mass of 100 g, the surface of the constituent particles is found

$$s_0 = \frac{G_{100}}{\rho_m \delta_{film}}, \text{ cm}^2, \quad (10)$$

where G_{100} – mass of the oil film on the surface of a MM with a mass of 100 g; ρ_m – used oil density, g/cm³; δ_{film} – thickness of the oil film in question, cm.

The next step is experimentally establish the thickness of the oil film on a plate of mineral material that is the same as the investigated MM. It is assumed that the thickness of the oil film does not depend on the surface configuration and is constant. It should be noted that there is an uncertainty factor in the result obtained due to the possible partial aggregation of fine fractions, and also due to the porosity of the material. Then, the required value of the surface of the MM included in the ACM is calculated from the established specific surface of the MM particles and the granulometric composition of the MM mixture using the relation

$$s_{cm} = \sum_{j=1}^n \frac{s_{0,j} g_j}{100}, \text{ cm}^2, \quad (11)$$

where $s_{0,j}$ – specific surface of 100 g of each j -th fraction of the mixture, cm².

From everything follows the complexity, cumbersomeness and the presence of errors in the results obtained in all methods, and the expediency of using differentiated methods for fine and coarse material is obvious: blowing the layer with air for fine fractions, for large fractions – to use the water permeability of the layer. Table 3 shows the specific surface area of the main MM.

From the analysis of Tab. 3, the following conclusion follows: the specific surface of the fractions that make up the ACM ranged from 1.3 m²/kg for crushed stone of 25–15 mm, to 340 m²/kg for particles smaller than 71 µm. In addition, although

the mass fraction of mineral powder in the ACM composition is small and lies within 6 %, its surface primarily makes the main contribution to the total surface area of mineral materials. This should be taken into account in the ACM mixing technology. The data given in Tab. 3 are reasonably approximated by the dependence

$$s = aDn. \quad (12)$$

Table 3

Specific surface of main mineral materials with density of 2.65 t/m³ [10]

Particle size, mm	Limestone, m ² /kg	Granite, m ² /kg	Quartz sand, m ² /kg	Diorite, m ² /kg
Less than 0.071	340	290	190	286
0.071–0.14	70	67	40	87
0.14–0.315	25	28	12	22
0.315–0.63	13	14	8,0	10.5
0.63–1.25	6	6.5	5,8	5.5
1.25–3	3.5	3.7	2,5	3.6
3–5	1.6	1.7	1,0	1.45
5–10	0.71	0.74	–	0.71
10–15	0.4	0.44	–	0.42
15–25	–	0.28	–	0.30
25–40	–	0.17	–	–

The values of the coefficients for various MM in calculations by formula (12) are given in Tab. 4 [10].

Table 4

Coefficients of approximating dependence (12) for calculations with different mineral materials

Material	Value of coefficients	
	a	n
Granite	68	–1.04
Dense limestone	70	–1.07
Quartz sand	42	–1.04

Table 5 gives the results of calculated and experimental determinations of the surface of various MM fractions [10].

An analysis of the data in the Table shows that for granite and limestone, the calculation method of the tetrad shape of grains is more acceptable, for sand – the calculated ratios for the cubic shape of particles [5]. The calculation method makes it possible to take into account the size of the fractions and the shape of the particles, which gives a number of advantages. For this reason, it is the main method for calculating the surface of the mineral components of the ACM.

Table 5

Comparison of methods for finding the specific surface of various mineral materials fractions (calculated and experimental methods for determining while using methods of air and water permeability)

Mineral material	Fraction size, mm	Average diameter Dave, mm	Specific surface area, m ² /kg			
			Calculation method for			Measurement
			ball $\frac{6}{d\rho}$	cube $\frac{8,5}{d\rho}$	tetrahedron $\frac{14,7}{d\rho}$	Method: air and water permeability
Mineral powder	0.0005–0.001	0.00075	3000	4250	7360	–
	0.001–0.002	0.0015	1500	2120	3680	–
	0.002–0.004	0.003	750	1060	1840	less then 0.071
	0.004–0,008	0.006	378	535	925	300–500
	0.008–0.017	0.012	189.0	268	463	–
	0.017–0.035	0.026	86.0	122	210	–
	0.035–0.071	0.05	44.5	63	109	–
Sand	0.071–0.14	0.115	19.5	27.6	48	70
	0.14–0.315	0.23	9.8	14.0	24.1	25
	0.315–0.63	0.47	4.8	6.8	11.7	13
	0.63–1.25	0.94	2.41	3.4	5.9	6
	1.25–3.0	2.12	1.07	1.52	2.62	3.5
Rubble	3.0–5	4.0	0.57	0.80	1.39	1.6
	5.0–10	7.5	0.30	0.43	0.74	0.71
	10.0–15	12.5	0.18	0.26	0.44	0.43
	15.0–25	20.0	0.113	0.16	0.28	–
	25.0–40	32.5	0.07	0.10	0.17	–
	40.0–70	55.0	0.04	0.06	0.10	–
The density of the material is assumed to be 2.65 t/m ³ .						

Structure of the exergy of the asphalt concrete mixture

The exergy of the ACM flow is determined by three components [1, 12–15]: thermomechanical $e_{pT,ACM}$, concentration $e_{c,ACM}$, and reaction $e_{r,ACM}$. The numerical values of the indicated components of the exergy of the substance in the flow for ACM can be found on the database given in the previous section.

The thermomechanical component of ACM exergy is determined [1]

$$e_{pT,ACM} = \sum g_j \bar{c}_p \left|_{t_0}^{t_{ACM}} (t_{ACM} - t_0) - T_0 \ln(T_{ACM}/T_0), \text{ MJ/t.} \quad (13)$$

Temperatures in the example are taken: finished ACM $t_{ACM} = 160$ °C, environment $t_0 = 20$ °C.

The heat capacity ACM, specific mass, isobaric, average in the temperature range of 20–160 °C for mixtures is determined by the given composition and heat capacity of the components

$$\bar{c}_p \Big|_{20}^{160} = \sum_{j=1}^3 \bar{c}_{p,j} \Big|_{20}^{160} g_j = 0.84 \cdot 0.06 + 0.84 \cdot 0.06 + 1.6 \cdot 0.88 = 1.51, \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}.$$

The mass fractions of the ACM components are given above, the mentioned heat capacities of the components are given in [9].

The value of the thermomechanical component of ACM exergy is found

$$e_{pT,ACM} = 1,51 \left[(160 - 20) - (273 + 20) \times \ln(273 + 160)/293 \right] = 38.6 \text{ MJ/t.}$$

The reaction component of the exergy of the ACM flow is calculated [1]

$$e_{r,ACM} = \sum g_j e_{\mu,j}, \text{ MJ/t}, \quad (14)$$

where $e_{\mu,j}$ – chemical exergy of ACM, MJ/t.

In the general case, the constituent mineral components of ACM: mineral powder (MP), SGM (sand-gravel mixture), bitumen. The reaction component of the SGM exergy is $e_{\mu,min.aggr} = 0$, this is due to the fact that it is represented primarily by silicon dioxide SiO_2 , and its chemical exergy is zero [11]. In the same place [11] we find the value of chemical exergy $e_{\mu,MP} = 1045$ MJ/t for dolomite CaCO_3 since dolomite most often makes up the MP. The reaction component of the bituminous binder $e_{\mu} = 41$ MJ/kg is given in [9]. Then, from relation (14), it is easy to calculate the reaction component of ACM exergy based on its average mass composition [1]

$$e_{r,ACM}'' = \sum g_j e_{\mu,j} = 0.82 \cdot 0 + \\ + 0.06 \cdot 1045 + 0.06 \cdot 41 \cdot 103 = 2523 \text{ MJ/t},$$

Based on the previously described method, the concentration component of ACM exergy is calculated

$$e_{c,ACM} = s_{cm} W_{adh}, \text{ MJ/t}. \quad (15)$$

As a result, we find the desired exergy of the substance in the flow for ACM

$$e_{ACM} = e_{pT,ACM} + e_{c,ACM} + e_{r,ACM} = \\ = 38.6 + 4.76 \cdot 10^{-3} + 2523 = 2561 \text{ MJ/t}.$$

From the analysis of the ratio of the values that make up the ACM exergy, it follows that the reaction component has the main specific gravity. It is two orders of magnitude higher than the next thermomechanical component in terms of specific gravity. The value of the concentration component of the ACM exergy is relatively small and comparable with the error in finding the exergy. The reaction component of ACM exergy is a transit component in the technological chain of transformation of initial ingredients into ACM and, for this reason, can be excluded. The need to exclude transit energy on the analysis results makes it possible to block its “noise” in the analysis of changes in the

exergy relative characteristics that are necessary to establish the thermodynamic efficiency of the components of the ACM production processes.

The revealed circumstances of the concentration component of ACM exergy remove the question of uncertainty about the influence of the error of its calculation on the results. “With a relatively small value of the concentration component of ACM exergy, the presented ideas about the relationship of its value with the energy costs for the mixing process are consistent with the empirical data that take place in the operation of the ACP mixing units: the minimum specific energy required for mixture formation based on the value of the concentration component of the ACM exergy turns out to be equal to ≈ 5 kJ/t” [10]. This value is in good agreement with the real costs, determined by the duration of the mixing process, the power of the mixer drive and its loading [15].

CONCLUSIONS

1. Thermodynamic analysis of technological processes in road construction is gaining more and more recognition [2, 3]. The analysis of the studies shows the impact on the durability and strength of the materials that make up the pavement, especially at different temperatures, is exerted by internal stresses arising from the mismatch of the thermophysical coefficients of the mineral materials that make up the ACM, including scrap ($d_y = 5\text{--}30$ mm) and bituminous binder. In this context, it is important to increase the proportion of ACM oriented bitumen by changing the dispersion and shape of particles of mineral materials.

2. The promotion of the processes of creating asphalt concrete pavement towards so-called “green energy” presupposes the reuse of the used pavement. The possibility of such use of materials while maintaining the quality of the ACM can be assessed by changing the concentration component of the ACM exergy, regardless of the ACM laying technology.

3. A physical model has been considered and a calculation method has been developed that makes it possible to relate the energy of adhesive interaction and the specific surface of mineral materials with the value of the concentration component of the asphalt concrete mixture.

4. The value of the concentration component of the exergy of the asphalt concrete mixture:

allows to evaluate the energy efficiency of its production at asphalt concrete plants based on the modern exergy method of thermodynamic analysis; gives a quantitative estimate of the energy consumption for carrying out the process of mixing the ingredients of the asphalt concrete mixture in the mixing unit of asphalt concrete plants.

5. The following steps need to be taken: studies to clarify the energy of adhesive interaction with various mineral materials involved in circulation when reusing used road pavement, with a dispersed composition, its uniformity and the shape of particles of mineral material; development of methods for determining and calculating the surface of particles of mineral dispersed materials; studies on the impact of the ratio between oriented bitumen and bulk bitumen in ACM on pavement performance.

This work has been carried out within the framework of the project on cooperation between Belarusian and Chinese scientists and specialists: "Outstanding Foreign Scientist Studio of Green Low-Carbon Technology for Pavement Construction and Maintenance" (Grant No GZS2022004) – 道路绿色低碳建养技术杰出外籍科学家工作室 (项目号 GZS2022004).

REFERENCES

1. Zhang Qing, Romaniuk V. N., Aliakseyeu Yu. G., How Qiang (2022) Thermodynamic Approaches in Assessing Quality, Efficiency and Environmental Friendliness of Asphalt Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (6), 490–498. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-490-498>.
2. Zavyalov M. A. (2007) *Thermodynamic Theory of Asphalt Pavement Life-Cycle*. Omsk, Publishing House of SibADI (The Siberian State Automobile and Highway University). 283 (in Russian).
3. Zavyalov M. A. (2008) *Formation and Assessment of the State of the Road Surface Based on Thermodynamic Theory (From Design to Renovation)*. Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy. 42 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Liu T., Aliakseyeu Yu. G., Li Z., Akeliev V. D., Minchenya V. T. (2022) Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35>.
5. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Aliakseyeu Yu. G., Shi J., Zankovich V. V. (2018) Specific Features of Heat and Mass Transfer Processes in Road Dressings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 517–526. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-517-526>.
6. Khroustalev B. M., Liu T., Akeliev V. D., Li Z., Aliakseyeu H. Yu., Zankovich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
7. Liu T., Zankovich V. N., Aliakseyeu Yu. G., Khroustalev B. M. (2019) Recycling of Materials for Pavement Dressing: Analytical Review. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (2), 104–112. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112>.
8. Khroustalev B. M., Veranko U. A., Zankovich V. V., Aliakseyeu Yu. G., Xuejun Yu., Shang B., Shi J. (2020) Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (3), 181–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194>.
9. Romaniuk V. N. (2010) *Intensive Energy Saving in Heat-technological Systems of Industrial Production of Building Materials*. Minsk, Belarusian National Technical University. 365 (in Russian).
10. Korolev I. V. (1986) *Ways to Save Bitumen in Road Construction*. Moscow, Transport Publ. 149 (in Russian).
11. Pesetsky S. S., Kovalev Ya. N., Koval V. N., Dubrovsky V. V., Romaniuk V. N. (2003) Modification of Bitumen with Polyethylene: Analysis of the Structure and Interfacial Interactions. *Uspekhi Kolloidnoi Khimii i Fiziko-Khimicheskoi Mekhaniki: Tez. Dokl. II Mezhdunar. Konf. «Kolloid»*, 20–24 Okt. [Advances in Colloidal Chemistry and Physicochemical Mechanics: Abstracts of the Reports of the 2nd International Conference "Colloid", October 20–24]. Minsk, 30 (in Russian).
12. Kazakov V. G., Lukanin P. V., Smirnova O. S. (2013) *Exergy Methods for Evaluating the Efficiency of Heat Engineering Installations*. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Technological University of Plant Polymers. 93 (in Russian).
13. Trubaev P. A., Besedin P. V., Zaytsev E. A. (2009) *Thermodynamic and Exergy Analysis of Heat Engineering Systems*. Belgorod, Publishing House of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 104 (in Russian).
14. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Romaniuk V. N. (2004) *Technical Thermodynamic. Part 2*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 560 (in Russian).
15. Khroustalev B. M., Romaniouk V. N. (2009) Determination of Required Energy Action at Formation of Asphalt Concrete Mixture. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 42–48 (in Russian).

Received: 04.10.2022

Accepted: 06.12.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-42-47>

UDC 678+669.189.21+677.46/.47

Comparative Study of Fiber Glass Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer on Cube and Cylinder

A. M. Sh. Al-obaidi¹⁾, S. N. Leonovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Abstract. A comparative analysis of polymers reinforced with glass fiber and polymers reinforced with carbon fiber was carried out on a cube and a cylinder in the laboratories of Baghdad. 36 samples were taken with fiber percentages of 1.0, 2.5 and 5.0 % by weight of cement. The methodology of this study included the use of composite polymer fibers in the external reinforcement of concrete beams for the purpose of improving their performance when bending by gluing polymer fibers to the surface. Group A tests of non-reinforced concrete beams with other reinforced polymer fibers were also implemented. Excellent results were obtained by adding two types of polymer fibers to a concrete sample. It was found that the polymer reinforced with glass fiber showed better results than the polymer reinforced with carbon fiber when testing samples for bending strength. However, in splitting strength, the carbon fiber reinforced polymer achieved higher performance than the glass fiber reinforced polymer. Whereas the results of a group of previous studies conducted to study the effect of fiber additives on the mechanical properties of concrete proved that their addition led to an increase in compression, tensile and bending resistance at rates that reached 25, 75 and 80 %, respectively.

Keywords: fiber, carbon fiber, fiberglass, polymer, bending, splitting, samples, beam, alkali resistance, epoxy resin, stress, composites, mechanical properties, failure

For citation: AL-obaidi A. M. Sh., Leonovich S. N. (2023) Comparative Study of Fiber Glass Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer on Cube and Cylinder. *Science and Technique*. 22 (1), 42–47. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-42-47>

Сравнительное исследование полимера, армированного стекловолокном, и полимера, армированного углеродным волокном, на кубе и цилиндре

Студ. А. М. Ш. Аль-Обайди¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В лабораториях Багдада проведен сравнительный анализ полимеров, армированных стекловолокном, с полимерами, армированными углеродным волокном, на кубе и цилиндре. Было отобрано 36 образцов с процентным содержанием волокна 1,0, 2,5 и 5,0 % от массы цемента. Методика данного исследования включала использование композиционных полимерных волокон во внешнем армировании бетонных балок для повышения прочности при изгибе при наклеивании полимерных волокон на поверхность. Выполнены испытания группы А неармированных бетонных балок с другими полимерными волокнами. Отличные результаты получены при добавлении двух типов полимерных волокон в бетон. Установлено, что полимер, армированный стекловолокном, имеет более высокие результаты, чем полимер, армированный углеродным волокном, при испытании образцов на прочность при изгибе. Однако прочность на раскалывание армированного углеродным волокном полимера достигла более высоких показателей, чем, армированного стекловолокном. Результаты группы предыдущих исследований, проведенных с целью изучения

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

влияния добавок фибры на механические свойства бетона, показали, что их добавка приводила к повышению сопротивления сжатию, растяжению и изгибу при скоростях, достигавших 25, 75 и 80 % соответственно.

Ключевые слова: волокно, углепластик, стекловолокно, полимер, изгиб, раскалывание, образцы, балка, щелочестойкость, эпоксидная смола, напряжение, композиты, механические свойства, отказ

Для цитирования: Аль-Обайди, А. М. Ш. Сравнительное исследование полимера, армированного стекловолокном, и полимера, армированного углеродным волокном, на кубе и цилиндре / А. М. Ш. Аль-Обайди, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 42–47. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-42-47>

Introduction

Polymer fibers have been successfully used for a long time in the aircraft and vehicle industries. Currently polymer fibers have found their use in civil engineering applications [1, 2] where external reinforcement was used to improve the performance of structures, such as strengthening concrete columns by a collar with polymer fibers is made around the outer circumference of the shaft to increase resistance and ductility, as well as it is used to increase the resistance to bending and shearing by attaching polymer fibers to the outer surface of the beams of the bishop [3–5].

There are usually three types of polymer fibers that are used in civil engineering, namely glass, aramid, and carbon fibers. Physical and mechanical properties differ not only between the types of these fibers but also for the same type of fiber [6–8].

According to the shape and length glass fiber can be divided into continuous fiber, fixed-length fiber and glass wool fiber [9–11] and according to the composition of the glass it can be divided into non-alkali, chemical resistant, high alkali, medium alkali, high strength, high elastic modulus and alkali resistant [12–14].

Polymer fibers alone are of limited use in civil engineering applications because they can transfer loads from one surface to another, and for this the matrix material plays a role [15–18].

Important in the function of polymer fibers as it works to bind polymer fibers together is to enable them to transporting loads and providing them with

protection against various environmental influences and damages resulting from handling. Binders are of several types such as polyester and epoxy. It is one of the most common polymeric materials and is usually used with high performance fibers [19–21].

Material and method

In this study 36 samples were collected from laboratories and distributed according to cube and cylinder with percentage of added fiber (1.0, 2.5, 5.0 %) from weight cement.

Flexural strength is defined as the maximum stress that the material exhibits at failure due to the three or four point elastic load. According to literature review studied bending behavior of concrete with compressive strength and density ranging from 10 to 25 MPa. By using the modified polymer and the test device it is possible to measure the flexural modulus in polymer composites.

In general, the strength of fiber-reinforced composites depends on the properties of the components and the interactions of the interface. It is well known that for fiber-reinforced composites, as the interfacial region plays a leading role in transferring the load between the fibers and the matrix, thus affecting mechanical properties such as strength, the flexural failure depends mainly on the adhesion of the fibers and the matrix. The tests were relied on to examine the cubes and the cylinder (Fig. 1) where the U-test device was used to test the samples (Tab. 1).



Fig. 1. U-test device

Table 1

Results of cylinder 11×15 cm applying splitting strength

Symbol sample of concrete	Stress, MPa	Load, kN	Range of splitting strength	Time, s	Area, mm ²	Pace, kN/s
Without fiber						
C1	2.10	57.2	2.050	5	17671.459	11.44
C2	1.95	55.0		5	17671.459	11.00
C3	1.90	52.0	1.850	4	17671.459	13.00
C4	1.80	50.0		4	17671.459	12.50
C5	1.80	55.1	1.865	4	17671.459	13.70
C6	1.93	53.0		5	17671.459	10.60
Fiber glass reinforced polymer						
C1 (1 %)	7.05	124.64	7.080	12	17671.459	10.30
C2 (1 %)	7.11	125.50		12	17671.459	10.45
C3 (2.5 %)	6.93	130.00	7.385	13	17671.459	10.0.
C4 (2.5 %)	7.84	132.00		12	17671.459	11.00
C5 (5 %)	7.90	137.60	7.505	13	17671.459	10.58
C6 (5 %)	7.11	135.00		13	17671.459	10.38
Carbon fiber reinforced polymer						
C1 (1 %)	7.11	126	7.55	11	17671.459	11.4
C2 (1 %)	7.99	127		11	17671.459	11.5
C3 (2.5 %)	7.22	128	7.28	12	17671.459	10.6
C4 (2.5 %)	7.34	130		12	17671.459	10.8
C5 (5 %)	7.50	132	7.85	11	17671.459	12.00
C6 (5 %)	8.20	134		11	17671.459	12.18

The diagram below shows the comparison of control samples cylinder against glass fiber reinforced polymer and carbon fiber reinforced polymer in splitting strength. The highest value was obtained when carbon fibers were mixed with 5 % μ as shown in (Fig. 2).

18 samples were collected for the flexural strength assay, where a comparison was made between the control samples and the samples to which fiber was added, and the highest percentage was found when fiber glass reinforced polymer was added with 5 % (Tab. 2).

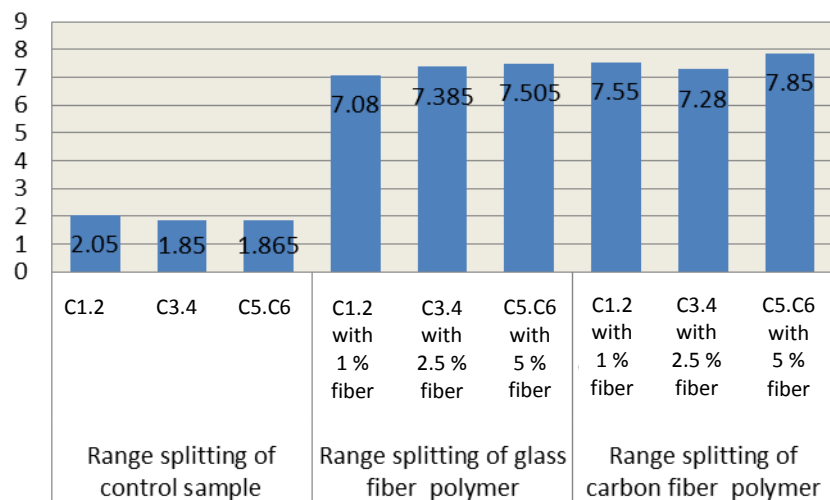


Fig. 2. Comparison of control samples cylinder against glass fiber reinforced polymer and carbon fiber reinforced polymer in splitting strength

Table 2

Results of cube 15×15×45 cm by applying to flexural strength

Symbol sample of concrete	Stress, MPa	Load, kN	Range flexural strength	Time, s	Area, mm ²	Pace, kN/s
Without fiber						
C1	4.522	34.14	4.375	3.4	7500	10.040
C2	4.230	33.00		3.2	7500	10.310
C3	5.634	42.90	5.202	5.0	7500	8.580
C4	4.770	40.00		5.0	7500	8.000
C5	4.900	44.70	4.955	4.0	7500	11.175
C6	5.010	41.00		6.0	7500	8.200
Fiber glass reinforced polymer						
C1 (1 %)	6.11	55	6.405	6	7500	9.16
C2 (1 %)	6.70	52		6	7500	8.66
C3 (2.5 %)	6.82	58	6.960	6	7500	9.66
C4 (2.5 %)	7.10	56		6	7500	9.33
C5 (5 %)	7.50	57	7.690	5	7500	10.60
C6 (5 %)	7.88	57		5	7500	11.40
Carbon fiber reinforced polymer						
C1 (1 %)	6.40	52	6.395	6	7500	8.66
C2 (1 %)	6.39	49		5	7500	9.80
C3 (2.5 %)	6.80	56	6.700	7	7500	8.00
C4 (2.5 %)	6.60	50		6	7500	8.33
C5 (5 %)	6.99	57	6.895	7	7500	8.14
C6 (5 %)	6.80	51		6	7500	8.50

Each two samples were collected separately depending on the added percentage to know the resulting differences as shown in (Fig. 3).

The mean value was taken to the three samples with respect to the cylinder and the cube without the fibers, and the mean value for splitting strength

test for the cylinder samples was 1.92 MPa, while for the cube was 4.844 MPa (Fig. 4).

The amount of addition was determined during the examination of the splitting strength samples and compared with the control samples, and developments and increases were found when adding fibers at all levels as shown (Fig. 5, 6).

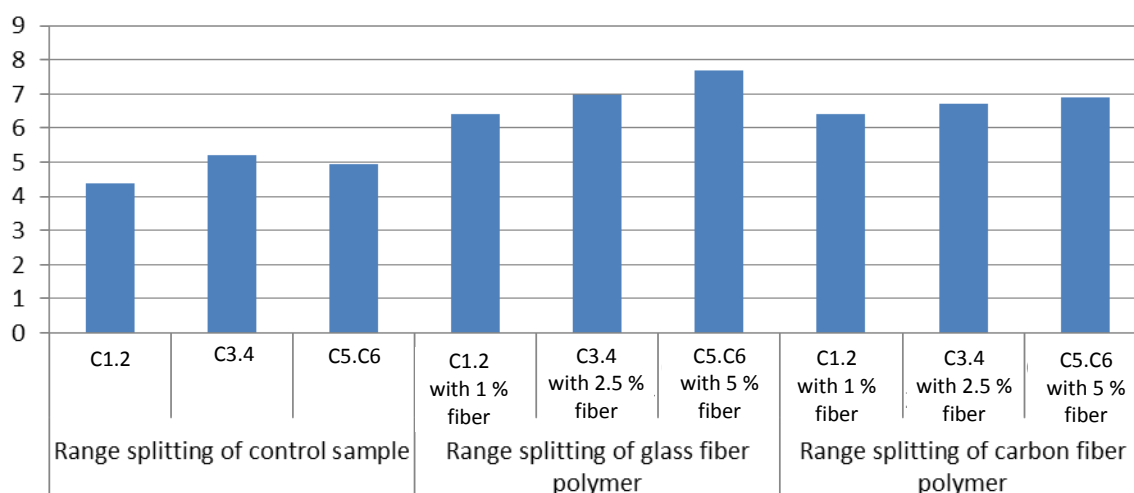


Fig. 3. Comparison between control samples cubes against fiber glass reinforced polymer and carbon fiber reinforced polymer in flexural strength

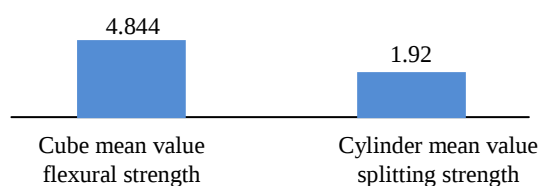


Fig. 4. Means value of flexural and splitting strength

Discussion

Samples were collected in this study where they depend on added fibers of carbon polymer and fiberglass where the percentage of added fibers was 1.0, 2.5 and 5.0 % and then the samples were tested by U-test for flexural and splitting strength. The samples were distributed depending on the type of examination that was used in this study. The samples were collected from cylinders and with dimensions of 11×15 cm, and 18 samples were collected with dimensions of 15×15×45 cm.

By examining the splitting strength to the cylinder, the average value of 6 samples without fiber was 1.92 MPa, and in the next stage, fiber glass reinforced polymer was added with (1.0, 2.5 and 5.0 %), respectively. Excellent results were obtained when examining the splitting strength and when adding fibers with 5 % of the splitting strength (7.505 MPa).

As for the second side of the comparison with carbon fiber reinforced polymer, the splitting strength

rates were high when they were compared with fiber glass reinforced polymer, and the rates were the highest when 5 % was added with 7.85 MPa. Tab. 2 shows the results of cube 15×15×45 cm by applying to flexural strength at 7 days. Where 18 cubes were collected, including 6 samples without fibers, 6 samples of fiber glass reinforced polymer, and 6 samples of carbon fiber reinforced polymer.

The mean value of the cube samples without fiber was 4.844 MPa, and the flexural strength value increased when fiber glass reinforced polymer was added, and it achieved the highest rates of flexural strength to 7.69 MPa with 5 %, and the same was the case when carbon fiber reinforced polymer was added and it was higher flexural strength ratings at 6.895 MPa.

Fig. 5 and 6 show the amount of increase in splitting strength and flexural strength when adding types of fiber. A comparison was made between the two types of fibers with the control group used in these shapes, and it was noted that the percentage of increase in splitting strength was higher when carbon fiber reinforced polymer was added when adding the three percentages [18, 22].

But it was not the case when examining the cubes, so the amount of increase in flexural strength rates when adding fiber glass reinforced polymer is higher than carbon fiber reinforced polymer (Fig. 3, 4).

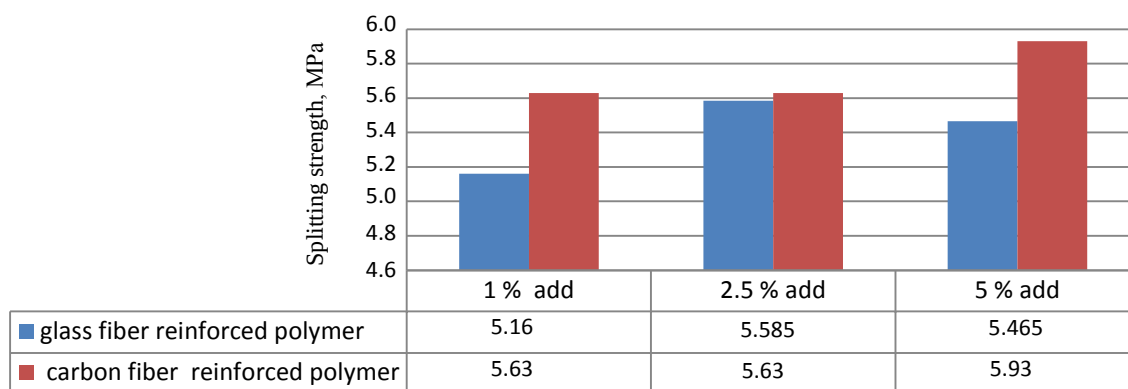


Fig. 5. Amount of increase in splitting strength when add types of fibers

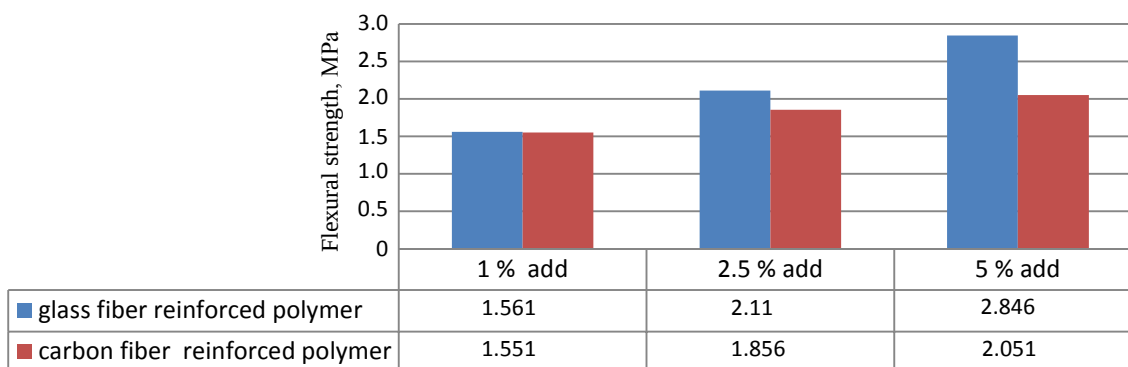


Fig. 6. Amount of increase in flexural strength when add types of fibers

CONCLUSION

The conclusion was drawn based on the amount of evolution in ratio splitting strength of cylinder and flexural strength to the examination of cubes. When comparing the two types of fibers, we notice that splitting strength. It was higher when added carbon fiber reinforced polymer compare fiberglass reinforced polymer [23, 24]. But when examining the flexural strength, we found that fiberglass reinforced polymer had achieved higher results than carbon fiber reinforced polymer [25], although the differences were slight between the two types of fibers [26–28].

REFERENCES

- American Concrete Institute (1996) *State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*. ACI 440R-96. Farmington Hills, Mich. 65.
- Saadatmanesh H., Ehsani M. R. (1991) RC Beams Strengthened with GFRP Plates. Parts I, II. *Journal of Structural Engineering*, 117 (11), 3417–3455. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1991\)117:11\(3434\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1991)117:11(3434)).
- Alfarabi S., Al-Sulaimani G., Basunbul I., Baluch M., Ghaleb B. (1994) Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates. *ACI Structural Journal*, 91 (2), 160–169. <https://doi.org/10.14359/4594>.
- Al-Sulaimani G. J., Sharif A. M., Basunbul I. A., Baluch M. H., Ghaleb B. N. (1994) Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding. *ACI Structural Journal*, 91 (4), 458–464. <https://doi.org/10.14359/4153>.
- Malek A. M., Saadatmanesh H., Ehsani M. (1998) Prediction of Failure Load of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at Plate Ends. *ACI Structural Journal*, 95 (2), 142–152. <https://doi.org/10.14359/534>.
- He J. H., Pilakoutas K., Waldron P. (1997) Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Plates. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Sapporo, 343–350.
- Takahashi Y., Sato Y., Ueda T., Maeda T., Kobayashi A. (1997) Flexural Behavior of RC Beams with Externally Bonded Carbon Fiber Sheet. *Proceedings of the Third International Symposium on Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Sapporo, 327–334.
- Swamy N., Mukhopadhyaya P., Lynsdale C. (1997) Ductility Consideration in Using GFRP Sheets to Strengthen and Upgrade Structures. *Proceedings of the Third International Symposium on Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Sapporo, 637–644.
- Grace N. F., Soliman A. K., Sayed G. A., Saleh K. R. (1998) Behavior and Ductility of Simple and Continuous Beams Reinforced with FRP Bars and Stirrups. *Journal of Composites for Construction*, 2 (4), 186–194. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(1998\)2:4\(186\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:4(186)).
- Bentur A., Mindess S. (1990) *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London, Elsevier Applied Science. <https://doi.org/10.4324/9781482298512>.
- Vairagade V., Kene K. (2012) Experimental Investigation on Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2 (3), 1037–1041.
- Soutsos M. N., Le T. T., Lampropoulos A. P. (2012) Flexural Performance of Fibre Reinforced Concrete Made with Steel and Synthetic Fibres. *Construction and Building Materials*, 36, 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042>.
- Abdalkader A., Elzaroug O., Abubaker F. (2017) Flexural Cracking Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 6 (8), 273–277.
- Balaguru P. N., Shah S. P. (1992) *Fiber Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill Inc.
- Meda A., Minelli F., Plizzari G. A. (2012) Flexural Behaviour of RC Beams in Fibre Reinforced Concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43 (8), 2930–2937. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.003>.
- Kang T., Kim W., Massone L. M., Galleguillos T. A. (2012) Shear-Flexure Coupling Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 109 (4), 435–444. <https://doi.org/10.14359/51683863>.
- Altun F., Haktanir T., Ari K. (2007) Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams. *Construction and Building Materials*, 21 (3), 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.006>.
- Shende A., Pande A. (2011) Comparative Study on Steel Fiber Reinforced Cum Control Concrete. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 6 (1), 116–120.
- Lok T. S., Xiao J. R. (1999) Flexural Strength Assessment of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (3), 188–196. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1999\)11:3\(188\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:3(188)).
- Abbas A., Mohsin S. S., Cotsovos D. (2010) Numerical Modelling of Fibre-Reinforced Concrete. *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCCBCE*. 473.
- Omrani E., Menezes P. L., Rohatgi P. K. (2016) State of the Art on Tribological Behavior of Polymer Matrix Composites Reinforced with Natural Fibers in the Green Materials World. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 (2), 717–736. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>.
- Byung H. O. (1992) Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibers. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118 (10), 2821–2836. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1992\)118:10\(2821\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:10(2821)).
- Barros J., Figueiras J. (1999) Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (4), 331–339. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1999\)11:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:4(331)).
- Chen S. (2004) Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 157 (2), 157–163. <https://doi.org/10.1680/stbu.2004.157.2.157>.
- Dwarakanath H., Nagaraj T. (1992) Comparative Study of Predictions of Flexural Strength of Steel Fiber Concrete. *ACI Materials Journal*, 88 (6), 714–720. <https://doi.org/10.14359/1262>.
- Rtayli N., Enneya N. (2020) Enhanced Credit Card Fraud Detection Based on SVM-Recursive Feature Elimination and Hyper-Parameters Optimization. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 102596. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2020.102596>.
- Wang C., Pan Y., Chen J., Ouyang Y., Rao J., Jiang Q. (2020) Indicator Element Selection and Geochemical Anomaly Mapping Using Recursive Feature Elimination and Random Forest Methods in the Jingdezhen Region of Jiangxi Province, South China. *Applied Geochemistry*, 122, 104760. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104760>.
- Lepoivre A., Boyard N., Levy A., Sobotka V. (2020) Heat Transfer and Adhesion Study for the FFF Additive Manufacturing Process. *Procedia Manufacturing*, 47, 948–955. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.291>.

Received:19.08.2022

Accepted: 18.10.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59>

УДК 629.341

Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды

Канд. техн. наук, доц. Е. М. Чикишев¹⁾, докт. техн. наук, доц. Д. В. Капский²⁾, С. С. Семченков²⁾

¹⁾Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье рассматривается вопрос расширения использования электробусов при перевозке пассажиров регулярными городскими маршрутами, которые способствуют значительному снижению общего загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. Проанализированы законодательные акты, подтверждающие государственную поддержку развития данной отрасли. Приведены результаты ездовых циклов электробусов АКСМ-Е321 и АКСМ-Е433 в Минске, электробусов ЛиАЗ-6274.00 и КАМАЗ-6282 в Тюмени и Москве. Выявлена корреляция удельного среднемесячного расхода электроэнергии и среднемесячной температуры окружающего воздуха. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на расход электроэнергии электробуса, для Москвы являются транспортные условия, для Тюмени – температура окружающего воздуха. Результаты исследований позволяют планировать использование электробусов на различных городских маршрутах на основе пробегов без подзарядки. Это может позволить разработать рекомендации по применению исследуемых марок электробусов на маршрутах определенной протяженностью и сложностью.

Ключевые слова: электробус, городской транспорт, пассажирские перевозки, низкие температуры, условия эксплуатации

Для цитирования: Чикишев, Е. М. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды / Е. М. Чикишев, Д. В. Капский, С. С. Семченков // *Наука и техника*. 2023. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59>

Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment

Е. М. Chikishev¹⁾, D. V. Kapskiy²⁾, S. S. Semchenkov²⁾

¹⁾Industrial University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers the issue of expanding the use of electric buses when transporting passengers on regular urban routes, which contribute to a significant reduction in the overall environmental pollution by road transport. Legislative acts

Адрес для переписки

Чикишев Евгений Михайлович
Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского, 38,
625000, г. Тюмень, Российская Федерация
Тел.: +734 52 53-95-40
chikishev_e@mail.ru

Address for correspondence

Chikishev Evgeniy M.
Industrial University of Tyumen
38, Volodarskogo str.,
625000, Tyumen, Russian Federation
Tel.: +734 52 53-95-40
chikishev_e@mail.ru

confirming the state support for the development of this industry are analyzed. The results of driving cycles of electric buses AKCM-E321 [AKSM-E321] and AKCM-E433 [AKSM-E433] in Minsk, electric buses ЛиАЗ-6274.00 [LiAZ-6274.00] and KAMAZ-6282 [KAMAZ-6282] in Tyumen and Moscow are presented. The correlation of the specific average monthly electricity consumption and the average monthly ambient temperature is revealed. It has been established that for Moscow, the most significant factor influencing the electric bus power consumption are transport conditions. The ambient air temperature was identified as a key factor for the city of Tyumen. The research results make it possible to plan the use of electric buses on various urban routes based on runs without recharging. This may allow us to develop recommendations for the use of the studied brands of electric buses on routes of a certain length and complexity.

Keywords: electric bus, urban transport, passenger transportation, low temperatures, operation conditions

For citation: Chikishev E. M., Kapskiy D. V., Semchenkov S. S. (2023) Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment. *Science and Technique*. 22 (1), 48–59. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59> (in Russian)

Введение

В конце XX в. большинство стран мира заявили о необходимости сокращения выбросов парниковых газов от деятельности человека в атмосферу. И первым глобальным документом, который регулировал данную проблему, являлся Киотский протокол, принятый в декабре 1997 г. в Японии и вступивший в силу в феврале 2005 г. С этого времени государства начали ужесточать требования в том числе к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автомобилей, так как они являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды, которые потребляют около 50 % от всей добываемой в мире нефти (продукты ее переработки бензин, дизельное топливо, моторное масло и др.).

Таким образом, во многих странах, кроме улучшения качества традиционных топлив – бензина и дизеля, наметилась тенденция к применению на транспорте альтернативной энергетики – сжиженного нефтяного газа, природного газа, электричества и др. Данному вопросу посвящено много исследований [1–17]. Начиная с 2014 г. в мире наблюдается стабильный рост электромобилей всех типов (PHEV и BEV). Если в 2014 г. их было менее 1 млн шт., то по итогам 2021 г. уже свыше 16,5 млн шт. [18].

В 2021 г. лидерами по продажам колесного электротранспорта стали Китай (3,3 млн шт.), Европейский союз (2,3 млн шт.) и Соединенные Штаты Америки (630 тыс. шт.). По состоянию на 1 января 2022 г. в Республике Беларусь было зарегистрировано 2538 электромобилей (0,08 % всех легковых автомобилей) и 109 электробусов (0,26 % всех автобусов). Российская Федерация пока значительно уступает по доле электромобилей (как по общему парку, так и по

продажам). В РФ за 2021 г. их было продано всего около 2250 шт.

Автомобильные заводы, имеющие самый большой объем продаж электротранспорта, – Tesla (США), SAIC (Китай) и Volkswagen (Германия). Наибольший парк электромобилей (BEV) от общего парка наблюдается в Норвегии (49 %), Исландии (19 %) и Швеции (8 %) [18]. Необходимо отметить, что в данную статистику не входят грузовые электромобили и электробусы.

В мире производство электробусов представлено такими компаниями, как: ADL (Шотландия), BYD (Китай), De Lijn (Бельгия), Ebusco (Голландия), Heuliez (Франция), Irizar (Испания), «Белкоммунмаш» (Республика Беларусь), МАЗ (Республика Беларусь), Proterra (США), Solaris (Польша), VDL Bus & Coach (Голландия), Volvo (Швеция), Yutong (Китай) и др. Лидером по производству и внедрению в городские сети электробусов со значительным отрывом является Китай. Страна производит более 90 % от общемирового парка [19].

Серийный выпуск электробусов в Республике Беларусь начат в 2017 г. и налажен на двух ведущих предприятиях. На сегодняшний день белорусский производитель предлагает электробусы с ультрабыстрой зарядкой (далее – ОС), быстрой зарядкой (далее – FC) и ночной зарядкой (далее – ОНС). В настоящее время взят устойчивый курс на развитие широкого применения транспортных средств с электрическим приводом. Действующими государственными программами Республики Беларусь предусматривается ряд мероприятий, направленных на увеличение доли транспортных средств с электрическим приводом как в области перевозок маршрутным пассажирским транспортом, так и в городах в целом. Следует

отметить, что триггером такого интенсивного применения транспортных средств с электрическим приводом в стране стали развитие атомной энергетики, строительство и ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.04.2021 № 213 (в ред. от 20.04.2022) была утверждена Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 гг. Реализация данной программы предусматривает создание производств грузового, пассажирского, специализированного, легкового и индивидуального электротранспорта, а также его компонентов, организацию научного обеспечения, стандартизацию, аттестацию и оценку соответствия электротранспорта (базовых компонентов) для его безопасной эксплуатации на дорогах общего пользования, создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта на основе общенациональной сети электрозарядных станций (далее – ЭЗС), формирование комплекса мер по стимулированию развития электротранспорта. Целью комплексной программы являются: создание новой области экономического роста на основе формирования отрасли машиностроения – производства электротранспорта, а также условий для увеличения количества используемых транспортных средств на электрической тяге, расширения инфраструктуры электротранспорта и минимизации негативных влияний на экологию. Комплексная программа включает: подпрограмму 1 «Производственно-технологическая база электротранспорта» и подпрограмму 2 «Создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта». Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.04.2021 № 245 (ред. от 15.04.2022) была утверждена Государственная программа «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 гг., в которой нашли отражение также вопросы, связанные с развитием транспортных средств с электрическим приводом. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.12.2021 № 710 был принят Национальный план действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., предусматривающий развитие электротранспорта (инфраструктуры) и городской мобильности. Одним из приоритетных направлений внедрения и расширения

использования низкоуглеродных технологий, способствующих переходу страны к углеродной нейтральности, выбран переход от углеводородного транспорта к электрическому. Принятые в последние годы меры по стимулированию приобретения электромобилей и развитию инфраструктуры привели к росту количества таких транспортных средств. Нашли отражения вопросы электротранспорта и в Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23.03.2021 № 165). Результаты реализации программы, несомненно, окажут позитивное влияние как на показатели работы автомобильного, городского электрического транспорта и метрополитена, так и на развитие смежных отраслей экономики (промышленности, строительства, торговли, сферы услуг) и, в конечном итоге, на макроэкономические показатели.

Некоторые российские автомобильные заводы уже производят электромобили, которые эксплуатируются на дорогах городов РФ. К таким можно отнести, прежде всего, электробусы, выпускаемые КАМАЗом и ЛиАЗом. Также в РФ намечена тенденция по принятию нормативных документов, которые способствуют развитию рынка электромобилей и зарядной инфраструктуры. Планируется внести изменения в ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» и ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» для соблюдения их требований при конструировании и эксплуатации электротранспорта. В качестве целевых показателей в РФ установлены в части создания инфраструктуры для зарядки транспортных средств с электрическим приводом с использованием быстрых и медленных зарядных станций на пилотных территориях в количестве не менее 2,9 тыс. шт. и 6 тыс. шт. соответственно (до 2024 г.), а также планируется: нарастить их количество до 29 тыс. и 44 тыс. шт. (к 2030 г.), наладить производство тяговых аккумуляторных батарей и компонентов к ним (до 2024 г.), увеличить долю производимых в РФ автомобилей с электрическим приводом на внутреннем рынке в 2030 г. не менее 10 % общего объема производства транспортных средств.

При анализе особенностей эксплуатации электробусов был выявлен ряд работ, в которых исследуются их конструктивные особенности, ездовые условия, функционирование и зарядка тяговых аккумуляторных батарей, а также зарядная инфраструктура [21–29]. Однако мало изучен вопрос расхода электроэнергии электробусов при эксплуатации в городской среде с учетом транспортных, природно-климатических и дорожных условий. Для эксплуатации важно знать влияние температуры окружающего воздуха, так как на большей части страны больше половины года преобладают низкие температуры [30, 31]. Поэтому цель исследования – выявить закономерности изменения расхода электроэнергии электробусов, работающих на городских регулярных маршрутах, от внешних условий эксплуатации. Объект исследования – процесс влияния транспортных, природно-климатических и дорожных условий на расход электроэнергии низкопольных городских электробусов большой вместимости АКСМ-Е321 и особо большой вместимости – АКСМ-Е433 в Минске, большой вместимости ЛиАЗ-6274.00 и КАМАЗ-6282, эксплуатирующихся в условиях Тюмени и Москвы.

Задачи исследования:

1) провести анализ факторов, влияющих на скорость разряда тяговых аккумуляторных батарей;

2) выявить закономерность влияния природно-климатических и транспортных условий на скорость разряда тяговых аккумуляторных батарей электробусов;

3) построить математические зависимости на основе проведенного исследования.

В результате анализа научной литературы установлены основные факторы, которые влияют на интенсивность разряда бортового источника энергии (тяговых аккумуляторных батарей или молекулярных накопителей) при эксплуатации в условиях города [9, 11, 19–21, 24, 26, 28]:

– транспортные условия и режим движения (скорость движения, количество перевозимых пассажиров, интенсивность движения и плотность транспортного потока (разгоны/торможения), количество остановочных пунктов и время нахождения на них);

– природно-климатические условия (температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра);

– дорожные условия (наличие регулируемых и нерегулируемых перекрестков, пешеходные переходы, качество дорожного полотна, уклон дороги, наличие на дорожном полотне осадков);

– технические характеристики электробуса (продолжительность эксплуатации транспортного средства, характеристики бортовых источников энергии, тяговых аккумуляторных батарей, накопителей энергии, схема работы дополнительного оборудования и др.);

– психофизиологические особенности водителя и др.

Также на уровень заряда бортовых источников энергии влияет соотношение протяженности участков разгона и торможения. На всех современных электробусах применяется асинхронный привод, тяговый инвертор предусматривает функцию рекуперации, благодаря которой при электродинамическом торможении осуществляется заряд бортовых источников энергии, что позволяет рекуперировать до 30 % энергии, израсходованной на пусках и разгонах.

В работах [19, 20, 23, 26] указывается, что к определяющим факторам относятся: скорость движения, число остановочных пунктов, количество регулируемых и нерегулируемых перекрестков и температура окружающего воздуха. Поэтому в проводимом исследовании будут учитываться данные факторы.

Характеристики электробусов и параметры исследуемых маршрутов

Технические характеристики исследуемых электробусов приведены в табл. 1 [32].

Отличительная особенность электробусов АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 – применение системы суперконденсаторов S585V39-K7-B фирмы AOWEI в качестве бортового накопителя энергии, который является основным источником электроэнергии для всех силовых потребителей. Накопление электроэнергии осуществляется в процессе зарядки от внешней зарядной станции (600В/500А) посредством пантографа. Накопитель состоит из: непосредственно модуля суперконденсатора, системы кондиционирования (поддерживает температуру внутри модуля суперконденсатора в допустимых пределах, не допуская перегрева), электронного блока управления BMS (блок контроллера заряда/разряда суперконденсатора).

Характеристики исследуемых марок электробусов
Characteristics of the investigated brands of electric buses

Характеристика	Электробус			
	КАМАЗ 6282	ЛиАЗ-6274	АКСМ-Е321	АКСМ-Е433
	Городской, большого класса	Городской, большого класса	Городской, большой вместимости	Городской, особо большой вместимости
Длина, мм	12400	12000	12090	18735
Номинальная пассажиро-вместимость, шт.	85	85	83	150
Количество мест для сидения, шт.	33	30	26	38
Полная масса, кг	18000	18000	18350	28000
Электродвигатель	ZF AVE 130	ZF AVE 130	АТЧД-250	ДТАН-160-4Б
Максимальная мощность двигателя, кВт	2×125	2×125	150	160
Накопитель энергии (аккумулятор)	Литий-титанатный	Литий-титанатный	Супер-конденсатор	Супер-конденсатор
Емкость накопителя энергии, кВт·ч	80	77	34	34
Запас хода, км	50	до 59	20	12,5
Тип зарядки	Портальная ультрабыстрая, медленная (ночная)	Трехфазная ультрабыстрая	Ультрабыстрая пантографная	Ультрабыстрая пантографная

Описание эксперимента

При обработке ездовых циклов электробусов использовались данные компаний-перевозчиков ТПАТП № 1 (Тюмень) и ГУП «Мосгортранс (Москва).

В Тюмени электробус ЛиАЗ-6274 эксплуатировался на регулярном городском маршруте № 10, а в Москве КАМАЗ 6282 на маршруте № МЗК.

Маршрут № 10 протяженностью 38,5 км проходит через магистральную ул. Республики и соединяет тюменский автовокзал – тюменский железнодорожный вокзал – международный аэропорт Рощино. В прямом и обратном направлениях насчитывается по 8 остановочных пунктов. В прямом направлении по пути следования 31 светофорный объект и 12 нерегулируемых пешеходных переходов. В обратном – 30 регулируемых перекрестков и 14 нерегулируемых пешеходных переходов. Движение осуществляется по дорогам I категории с выездом на пригородную часть при движении в аэропорт. Маршрут следования состоит в основном из прямых отрезков с малым количеством уклонов и поворотов, опасные участки отсутствуют. Средний дневной пробег около 200 км.

Маршрут № МЗК протяженностью 15 км проходит по центральной части города и соединяет проспект Буденного со станцией метро «Лубянка». В прямом направлении насчитывается 22 остановочных пункта, а в обратном – 21. В прямом направлении по пути следования 25 светофорных объектов, в обратном – 21. Движение осуществляется по дорогам I категории. Маршрут следования состоит в основном из прямых отрезков с малым количеством уклонов и поворотов, опасные участки отсутствуют. Средний дневной пробег около 250 км.

Полученные данные были обработаны и сведены в табл. 2.

Объем выборки данных после устранения грубых ошибок составил: для Тюмени – 146 значений, для Москвы – 119.

Для установления уровня влияния температуры окружающего воздуха и транспортных условий минимизирована переменность ряда прочих определяющих факторов:

– на каждом из маршрутов исследовался один и тот же электробус, которым управляли два определенных водителя (работа осуществлялась в две смены);

Таблица 2

**Фрагмент ездовых данных
на городских регулярных маршрутах
Driving data fragment on urban regular routes**

Дата	Дневной пробег, км	Средне-суточная температура воздуха, °C	Расход электроэнергии на маршрут следования, кВт·ч	Расход на 100 км, кВт·ч
Маршрут № 10 (Тюмень)				
22.10	208	5	230	113
23.10	208	1	233	115
24.10	207	6	201	97
25.10	207	5	236	116
28.10	197	9	198	96
29.10	220	-2	238	117
30.10	209	-2	239	118
31.10	166	-4	185	119
Маршрут № МЗК (Москва)				
10.01	245	-5	509	207,8
11.01	245	-11	513	209,4
12.01	244	-13	513	210,1
13.01	244	-11	512	209,8
14.01	245	1	504	205,7
17.01	244	-2	507	207,8
18.01	245	-5	510	208,2
19.01	245	-7	512	209,0

– учтены ездовые циклы только будних дней (с понедельника по четверг);

– на протяжении всего исследования применялись одни и те же типы шин;

– не учитывались затраты энергии на дополнительное оборудование – кондиционер. Отопители салонов электробусов работают на дизельном топливе, т. е. не расходуют электроэнергию;

– на изучаемых маршрутах электробусы не имеют нулевых пробегов для подзарядки, так как электрозарядные станции находятся на конечных остановочных пунктах.

Результаты исследования

На основе обработки ездовых экспериментов в программе Microsoft Excel построены графические зависимости, описывающие их (рис. 1, 2).

В результате обработки ездовых циклов по Москве установлено, что диапазон температур воздуха в исследуемом интервале времени, при которых эксплуатировался электробус, составлял от -13 до +27 °C. Расход электроэнергии изменялся от 196,7 кВт·ч/100 км до 211,1 кВт·ч/100 км. Минимальный расход зафиксирован при температуре окружающего воздуха +11 °C, а максимальный при -12 °C. Разница между максимальным и минимальным значением расхода электроэнергии составляет 7 %.

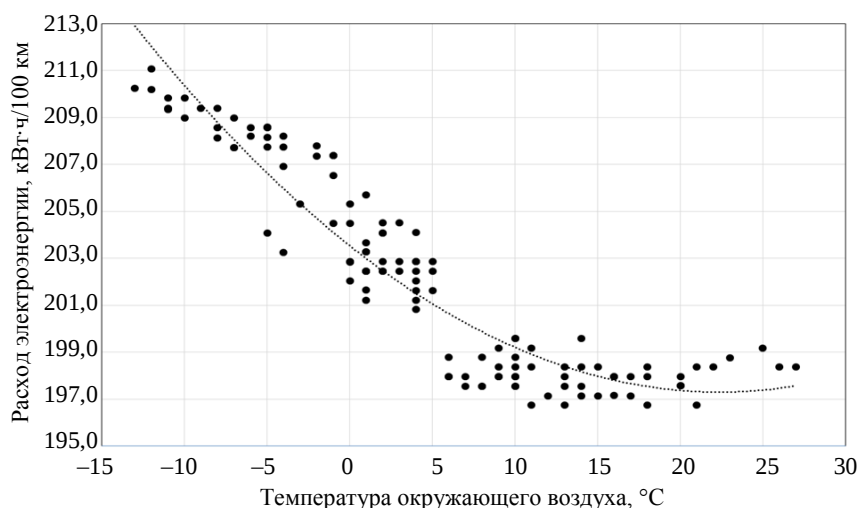


Рис. 1. Результаты эксперимента по расходу электроэнергии электробусом при эксплуатации в различных температурных условиях на маршруте № МЗК (Москва)

Fig. 1. Results of electric bus power consumption experiment under various temperature conditions on route No M3K (Moscow)

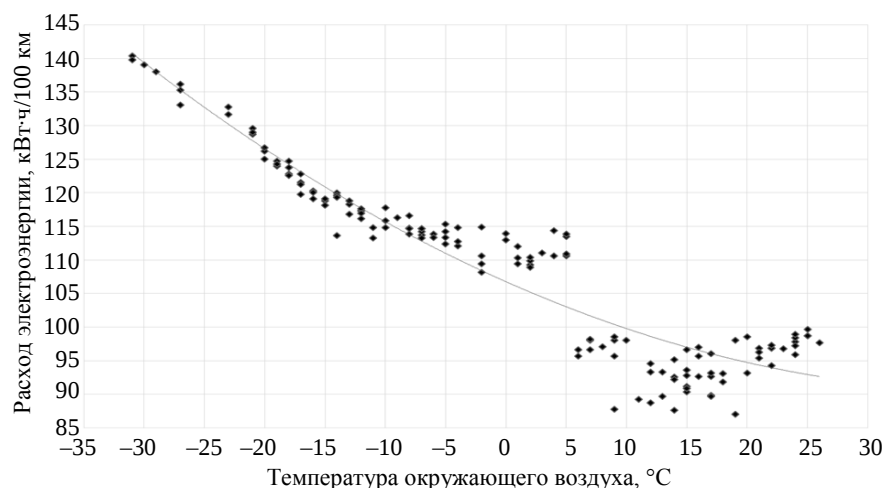


Рис. 2. Результаты эксперимента по расходу электроэнергии электробусом при эксплуатации в различных температурных условиях на маршруте № 10 (Тюмень)

Fig. 2. Results of electric bus power consumption experiment under various temperature conditions on route No 10 (Tyumen)

В результате обработки ездовых циклов по Тюмени установлено, что диапазон температур воздуха в исследуемом интервале времени, при которых эксплуатировался электробус, составлял от -31 до $+26$ °C. Расход электроэнергии изменялся от $87,6$ кВт·ч/100 км до $140,4$ кВт·ч/100 км. Минимальный расход зафиксирован при температуре окружающего воздуха $+14$ °C, а максимальный при -31 °C. Разница между максимальным и минимальным значением расхода электроэнергии составляет 38 %.

На представленных графиках рис. 1 и 2 видно, что при температурах окружающего воздуха от $+5$ °C и ниже наблюдается некоторое увеличение электроэнергии, которое более выражено для электробуса, эксплуатируемого в Тюмени. Можно предположить, что расход электроэнергии при температурах ниже $+5$ °C увеличивается, прежде всего, за счет системы подогрева аккумуляторных батарей (на российских электробусах установлена система термостатирования для обогрева тяговых аккумуляторных батарей). И чем ниже значения температур, тем более продолжительное время

работает данная система и расходует дополнительную энергию. Таким образом, можно сказать, что температура окружающего воздуха влияет на расход электроэнергии не напрямую, а косвенно, вследствие функционирования системы термостатирования.

На основе построенных графических зависимостей (рис. 1 и 2) в программе Microsoft Excel рассчитаны регрессионные квадратичные математические модели, описывающие закономерность изменения расхода электроэнергии электробусами:

для маршрута в Москве

$$q_{\text{эл КАМАЗ}} = 0,0121t_{\text{в}}^2 - 0,5527t_{\text{в}} + 203,6; \quad (1)$$

для маршрута в Тюмени

$$q_{\text{эл ЛиАЗ}} = 0,0097t_{\text{в}}^2 - 0,7958t_{\text{в}} + 106,77, \quad (2)$$

где $t_{\text{в}}$ – фактическая среднесуточная температура окружающего воздуха, °C.

Некоторые статистические характеристики математических моделей (1), (2) получены с использованием программы Statistica 8.0 и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики математических моделей

Statistical characteristics of mathematical models

Номер маршрута	Коэффициент детерминации, R^2	Средняя ошибка аппроксимации, %	Критерий Фишера F (0,95)	t-критерий
$q_{\text{эл КАМАЗ}}, \text{ № МЗК}$	0,89	2,2	360	206
$q_{\text{эл ЛиАЗ}}, \text{ № 10}$	0,85	4,7	1009	64

Проводя анализ значений статистических характеристик, представленных в табл. 3, можно заключить, что коэффициенты детерминации 0,89 и 0,85 свидетельствуют о том, что на долю вариации температуры окружающего воздуха приходится большая часть по сравнению с остальными факторами в модели, влияющими на изменение расхода электроэнергии. Таким образом, полученные математические модели имеют высокое практическое значение. Статистическая значимость коэффициентов подтверждена значениями критерия Стьюдента (t -критерия). Исходя из того, что средняя ошибка аппроксимации не превышает 5 %, полученные модели можно использовать в качестве регрессии. Значения критерия Фишера F при уровне доверительной вероятности 0,95 больше табличного, следовательно, регрессионные модели адекватно описывают влияние температуры окружающего воздуха на расход энергии.

В 2020 г. в Минске исследовалась работа электробусов АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 при эксплуатации на городских маршрутах. Данные о работе электробусов обработаны и сгруппированы (определен удельный расход электроэнергии по каждой модели, приведена среднемесячная температура воздуха). Результаты исследования представлены на рис. 3. По схожей методике с применением средств статистического анализа получены зависимости удельного расхода электроэнергии от среднемесяч-

ной температуры воздуха, результаты представлены на рис. 4. Следует учесть, что данные модели электробусов имеют дизельное отопление и не оборудованы системами климат-контроля. Таким образом, влияние сопутствующих факторов на полученные удельные значения расхода электроэнергии минимально и мы имеем дело с удельным расходом электроэнергии на тягу транспортных средств с электрическим приводом (с учетом рекуперации энергии).

Поскольку электробусы АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 реализованы по концепции ОС ультрабыстрой зарядки в процессе эксплуатации при низких температурах, выявлены некоторые дополнительные факторы, влияющие на режимы их эксплуатации. К ним относится неплотное прилегание в точке контакта угольной вставки пантографа к контактным шинам зарядной станции модели СЗА-01(600V/500A), в результате чего происходит выгорание угольной вставки пантографа, а в зимнее время это приводит к ее сколам. Угольная вставка пантографа требует дополнительного внимания, очистки от нагара, такие же действия необходимы и контактным шинам зарядной станции. Повышение контактного сопротивления и падение напряжения в зимнее время вызывают увеличение времени зарядки, снижение ее качества; оборудование зарядных станций подвержено замерзанию, необходимы дополнительное время и средства для его обслуживания.

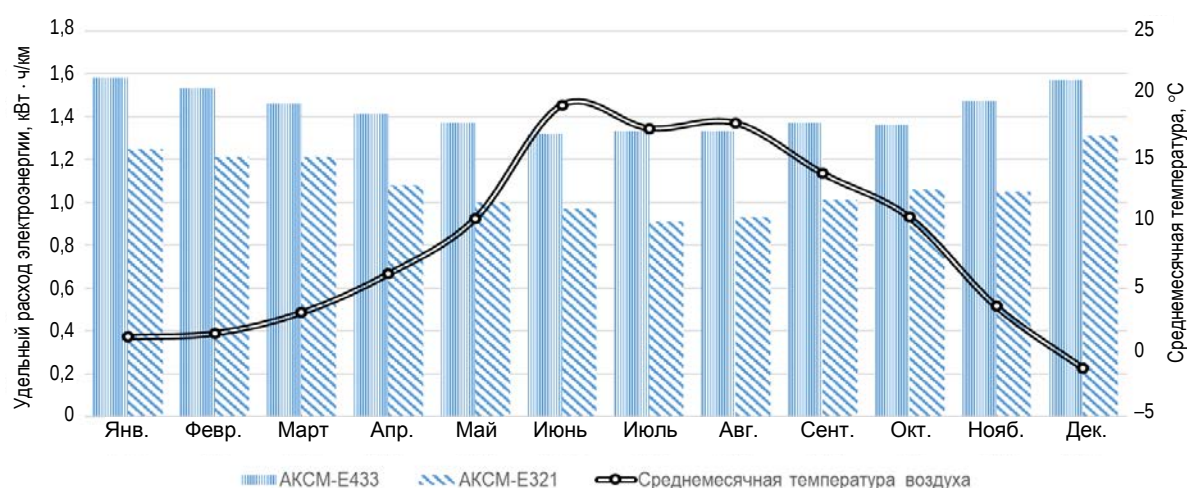


Рис. 3. Результаты исследования удельного расхода электроэнергии электробусов с суперконденсаторными накопителями энергии в Минске

Fig. 3. Results of the study of specific electricity consumption of electric buses with supercapacitor energy storage devices in Minsk

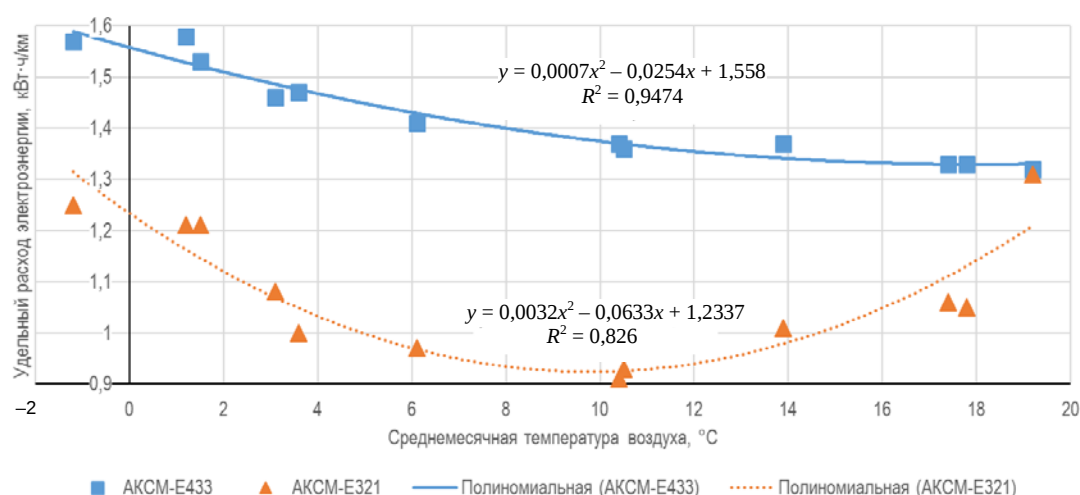


Рис. 4. Результаты статистической обработки зависимости удельного расхода электроэнергии от среднемесячной температуры воздуха электробусов с суперконденсаторными накопителями энергии в Минске

Fig. 4. Results of statistical processing of dependence of the specific power consumption from average monthly air temperature of electric buses with supercapacitor energy storage in Minsk

Перегрев силовой электроники зарядной станции при непрерывном использовании приводит к срабатыванию защиты по перегреву, в результате чего происходит ограничение зарядного тока и увеличение времени зарядки, в условиях снегопадов размещение и позиционирование электробуса к шинам зарядной станции затруднено.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при схожих технических характеристиках электробусов (с учетом введенных ограничений эксперимента и в одинаковых диапазонах температур) наблюдается значительно больший расход электроэнергии на маршруте в Москве по сравнению с Тюменью. Например, при температуре +10 °C электробус расходует энергии больше на 51 %, а при –10 °C на 44 %. Это можно объяснить тем, что маршрут в Москве проходит в центральной части с более плотным транспортным потоком, чем в Тюмени. На тюменском маршруте есть участок (при следовании в аэропорт и из него) протяженностью 8 км без регулируемых перекрестков и светофоров. Таким образом, 42 % этого маршрута проходит с установившейся скоростью. Еще одним фактором является количество остановочных пунктов, разгонов и торможений. Исходя из характери-

стик маршрутов установлено, что в Москве в среднем на каждые 350 м приходится одна остановка. В Тюмени этот показатель на 85 % выше – в среднем расстояние между остановками составляет 2400 м.

2. Как показал эксперимент, для московского маршрута № М3К значительная доля расхода электроэнергии, при прочих схожих условиях, приходится на скорость движения в транспортном потоке, а также количество разгонов и торможений при посадке и высадке пассажиров. Для тюменского маршрута № 10 более весомой является температура окружающего воздуха. В отрицательном диапазоне температур увеличение расхода энергии осуществляется за счет функционирования системы термостатирования, предназначенной для обогрева тяговых батарей.

3. Тенденция увеличения удельного расхода электроэнергии по мере снижения температуры окружающего воздуха прослеживается также и для электробусов АКСМ-E321, АКСМ-E433.

Статья подготовлена в рамках реализации Государственного задания в сфере науки на выполнение коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России, по проекту «Новые закономерности и решения для функционирования городских транспортных систем в парадигме «Переход от владения личным автомобилем к мобильности как услуге»» (№ 0825-2020-0014, 2020–2022 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Azemsha, S. A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity / S. Azemsha, D. Kapski, P. Pegin // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. P. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.
2. Influence of Ambient Temperature on the CO₂ Emitted with Exhaust Gases of Gasoline Vehicles / D. Chainikov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 142. P. 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012109>.
3. Chikishev, E. Assessment of External Factors Influence on the Fuel Consumption of a Diesel Bus Operating on a City Route / E. Chikishev, D. Chainikov // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 61. P. 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057>.
4. Giraldo, M. Real Emissions, Driving Patterns and Fuel Consumption of In-use Diesel Buses Operating at High Altitude / M. Giraldo, J. I. Huertas // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 77. P. 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>.
5. Comparison of Real Driving Emissions from Euro VI Buses with Diesel and Compressed Natural Gas Fuels / A. Gómez [et al.] // *Fuel*. 2019. Vol. 2891. P. 119836. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119836>.
6. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal / I. Frade [et al.]. *Transportation Research Record*. 2011. Vol. 2252. P. 91–98. <https://doi.org/10.3141/2252-12>.
7. Ivanov, A. Level Recession of Emissions Release by Motor-and-Tractor Diesel Engines Through the Application of Water-fuel Emulsions / A. Ivanov, E. Chikishev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 50. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012005>.
8. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21. № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>.
9. Hnatov, A. Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport / A. Hnatov, S. Arhun, S. Ponikarovska // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14, No 4. P. 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
10. Kuharonak, G. M. Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines / G. M. Kuharonak, D. V. Kapskiy, V. I. Berezun // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>.
11. Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses / P. Muñoz [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 2571. P. 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>.
12. Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies / S. R. Oprešnik [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, No 8. P. 2160. <https://doi.org/10.3390/en11082160>.
13. Özener, O. Fuel Consumption and Emission Evaluation of a Rapid Bus Transport System at Different Operating Conditions / O. Özener, M. Özkan // *Fuel*. 2020. Vol. 265. P. 117016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117016>.
14. Effects of Passenger Load, Road Grade, and Congestion Level on Real-World Fuel Consumption and Emissions from Compressed Natural Gas and Diesel Urban Buses / F. Rosero [et al.] // *Applied Energy*. 2021. Vol. 282. P. 116195. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116195>.
15. Estimation of Bus Emission Models for Different Fuel Types of Buses under Real Conditions / C. Wang [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641. P. 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289>.
16. Low-Carbon Oriented Optimal Energy Dispatch in Coupled Natural Gas and Electricity Systems / Y. Wang [et al.] // *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. P. 115948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115948>.
17. Real-Road Driving and Fuel Consumption Characteristics of Public Buses in Southern China / H. Yu [et al.] // *International Journal of Automotive Technology*. 2020. Vol. 21, No 1. P. 33–40. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0004-0>.
18. Electric Vehicles [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>. Date of access: 25.06.2022.
19. Chikishev, E. Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus / E. Chikishev // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. P. 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>.
20. Gorbunova, A. Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles / A. Gorbunova, I. Anisimov, E. Magaril // *Sustainability (Switzerland)*. 2020. Vol. 12, No 14. P. 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>.
21. Bezruchonak, A. Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus / A. Bezruchonak // *European Spatial Research and Policy*. 2019. Vol. 26, No 1. P. 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>.
22. Brdulak, A. Development Forecasts for the Zero-Emission Bus Fleet in Servicing Public Transport in Chosen EU Member Countries / A. Brdulak, G. Chaberek, J. Jagodzinski // *Energies*. 2020. Vol. 13, No 6. P. 4239. <https://doi.org/10.3390/en13164239>.
23. Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus / F. Cigarini [et al.] // *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12, No 1. Art. No 7. <https://doi.org/10.3390/wevj12010007>.
24. Fadyushin, A. Influence of the Parameters of the Bus Lane and the Bus Stop on the Delays of Private and Public Transport / A. Fadyushin, D. Zakharov // *Sustainability (Switzerland)*. 2020. Vol. 12, No 22. Art. No 9593. <https://doi.org/10.3390/su12229593>.
25. He S. Y., Kuo Y.-H., Wu D. (2016) Incorporating Institutional and Spatial Factors in the Selection of the Optimal

- Locations of Public Electric Vehicle Charging Facilities: A Case Study of Beijing, China / S. Y. He, Y.-H. Kuo, D. Wu. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 67. P. 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>.
26. Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient / P. Kremer [et al.] // *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 2021–July. 2021. P. 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.
 27. Todoruț, A. Replacing Diesel Buses with Electric Buses for Sustainable Public Transportation and Reduction of CO₂ Emissions / A. Todoruț, N. Cordoș, C. Iclodean // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. Vol. 29, No 5. P. 3339–3351. <https://doi.org/10.15244/pjoes/112899>.
 28. Sathaye, N. An Approach for the Optimal Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Highway Corridors / N. Sathaye, S. Kelley // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2013. Vol. 59. P. 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003>.
 29. Optimizing the Spatio-Temporal Deployment of Battery Electric Bus System / R. Wei [et al.] // *Journal of Transport Geography*. 2018. Vol. 68. P. 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>.
 30. Assessment of Adaptability of Natural Gas Vehicles by the Constructive Analogy Method / I. Anisimov [et al.] // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2017. Vol. 12, No 6. P. 1006–1017. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017>.
 31. Petrov, A. Electric Bus in Tyumen: The Chase for Trends and Problems of Exploitation / A. Petrov, D. Petrova // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001014>.
 32. Бодня, О. Все электробусы, которые есть в России: от серийных до опытных [Электронный ресурс] / О. Бодня // 5 колесо. 2022. Режим доступа: <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/opyty-s-elektrichestvom>. Дата доступа: 15.06.2022.
- Поступила 09.08.2022
Подписана в печать 15.11.2022
Опубликована онлайн 31.01.2023
- REFERENCES
1. Azemsha S., Kapski D., Pegin P. (2018) A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity. *Transportation Research Procedia*, 36, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.
 2. Chainikov D., Chikishev E., Anisimov I., Gavaev A. (2016) Influence of Ambient Temperature on the CO₂ Emitted with Exhaust Gases of Gasoline Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 142, 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012109>.
 3. Chikishev E., Chainikov D. (2020) Assessment of External Factors Influence on the Fuel Consumption of a Diesel Bus Operating on a City Route. *Transportation Research Procedia*, 61, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057>.
 4. Giraldo M., Huertas J. I. (2019) Real Emissions, Driving Patterns and Fuel Consumption of In-use Diesel Buses Operating at High Altitude. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>.
 5. Gómez A., Fernández-Yáñez P., Soriano J. A., Sánchez-Rodríguez L., Mata C., García-Contreras R., Armas O., Cárdenas M. D. (2021) Comparison of Real Driving Emissions from Euro VI Buses with Diesel and Compressed Natural Gas Fuels. *Fuel*, 2891, 119836. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119836>.
 6. Frade I., Ribeiro A., Gonçalves G., Antunes A. (2011) Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, 2252, 91–98. <https://doi.org/10.3141/2252-12>.
 7. Ivanov A., Chikishev E. (2017) Level Recession of Emissions Release by Motor-and-Tractor Diesel Engines Through the Application of Water-fuel Emulsions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 50, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012005>.
 8. Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N., Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian).
 9. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. (2017) Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14 (4), 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
 10. Kuharonak G. M., Kapski D. V., Berezun V. I. (2020) Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (4), 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>.
 11. Muñoz P., Franceschini E. A., Levitan D., Rodriguez C. R., Humana T., Perelmuter G. C. (2022) Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses. *Energy Conversion and Management*, 2571, 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>.
 12. Oprešnik S. R., Seljak T., Vihar R., Gerbec M., Katrašnik T. (2018) Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies. *Energies*, 11 (8), 2160. <https://doi.org/10.3390/en11082160>.
 13. Özener O., Özkan M. (2020) Fuel Consumption and Emission Evaluation of a Rapid Bus Transport System at Different Operating Conditions. *Fuel*, 265, 117016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117016>.
 14. Rosero F., Fonseca N., López J.-M., Casanova J. (2021) Effects of Passenger Load, Road Grade, and Congestion Level on Real-World Fuel Consumption and Emissions

- from Compressed Natural Gas and Diesel Urban Buses. *Applied Energy*, 282, 116195. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116195>.
15. Wang C., Ye Z., Yu Y., Gong W. (2018) Estimation of Bus Emission Models for Different Fuel Types of Buses under Real Conditions. *Science of the Total Environment*, 640–641, 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289>.
 16. Wang Y., Qiu J., Tao Y., Zhang X., Wang G. (2020) Low-carbon Oriented Optimal Energy Dispatch in Coupled Natural Gas and Electricity Systems. *Applied Energy*, 280, 115948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115948>.
 17. Yu H., Liu Y., Li J., Liu H., Ma K. (2020) Real-Road Driving and Fuel Consumption Characteristics of Public Buses in Southern China. *International Journal of Automotive Technology*, 21 (1), 33–40. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0004-0>.
 18. Electric Vehicles. Available at: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles> (accessed 25 June 2022).
 19. Chikishev E. (2021) Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus. *Transportation Research Procedia*, 57, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>.
 20. Gorbunova A., Anisimov I., Magaril E. (2020) Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)*, 12 (14), 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>.
 21. Bezruchonak A. (2019) Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus. *European Spatial Research and Policy*, 26 (1), 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>.
 22. Brdulak A., Chaberek G., Jagodzinski J. (2020) Development Forecasts for the Zero-Emission Bus Fleet in Serving Public Transport in Chosen EU Member Countries. *Energies*, 13 (6), 4239. <https://doi.org/10.3390/en13164239>.
 23. Cigarini F., Fay T.-A., Artemenko N., Göhlich D. (2021) Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus. *World Electric Vehicle Journal*, 12 (1), 1–22, 7. <https://doi.org/10.3390/wevj12010007>.
 24. Fadyushin A., Zakharov D. (2020) Influence of the Parameters of the Bus Lane and the Bus Stop on the Delays of Private and Public Transport. *Sustainability (Switzerland)*, 12 (22), 1–18, 9593. <https://doi.org/10.3390/su12229593>.
 25. He S. Y., Kuo Y.-H., Wu D. (2016) Incorporating Institutional and Spatial Factors in the Selection of the Optimal Locations of Public Electric Vehicle Charging Facilities: A Case Study of Beijing, China. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>.
 26. Kremer P., Cigarini F., Göhlich D., Park S. (2021) Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient. *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 2021–July, 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.
 27. Todoruț A., Cordoș N., Iclodean C. (2020) Replacing Diesel Buses with Electric Buses for Sustainable Public Transportation and Reduction of CO₂ Emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29 (5), 3339–3351. <https://doi.org/10.15244/pjoes/112899>.
 28. Sathaye N., Kelley S. (2013) An Approach for the Optimal Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Highway Corridors. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 59, 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003>.
 29. Wei R., Liu X., Ou Y., Fayyaz S. K. (2018) Optimizing the Spatio-Temporal Deployment of Battery Electric Bus System. *Journal of Transport Geography*, 68, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>.
 30. Anisimov I., Ivanov A., Chikishev E., Chainikov D., Reznik L., Gavaev A. (2017) Assessment of Adaptability of Natural Gas Vehicles by the Constructive Analogy Method. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12 (6), 1006–1017. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017>.
 31. Petrov A., Petrova D. (2019) Electric Bus in Tyumen: The Chase for Trends and Problems of Exploitation. *E3S Web of Conferences*, 110, 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001014>.
 32. Bodnya O. (2022) All Electric Buses That Are in Russia: from Serial to Experimental. 5 *Koleso* [5 Wheel]. Available at: <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/opyty-s-elektrichestvom> (accessed 15 June 2022) (in Russian).

Received: 09.08.2022

Accepted: 15.11.2022

Published online: 31.01.2023

Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств

Часть 1. Стандартизация и основные применяемые конструкции головного освещения

Канд. физ.-мат. наук, доц. С. П. Сернов¹⁾, канд. техн. наук Д. В. Балохонов¹⁾, Л. М. Коничева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Открытое акционерное общество «Руденск», испытательная лаборатория (Руденск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Основной задачей головного освещения (фар) транспортных средств является освещение дороги для обеспечения безопасности дорожного движения. Принципы конструирования фар транспортных средств остаются неизменными уже на протяжении 50–60 лет, однако сами современные транспортные средства значительно отличаются от своих аналогов полувековой давности. Современные автомобили быстрее, имеют меньшие габаритную высоту и массу, что усложняет задачу по обеспечению безопасности дорожного движения в темное время суток: водителю нужно видеть дальше, чтобы вовремя отреагировать на изменение дорожной обстановки, что является косвенной причиной увеличения силы света фар. Из-за низкой посадки водители гораздо чаще бывают ослеплены фарами попутного и встречного транспорта, что приводит к дорожно-транспортным происшествиям. Распределение силы света фар транспортных средств (особенно фар ближнего света) имеет резкую светотеневую границу, однако из-за большой силы света фар и низкого их размещения даже рассеянный свет может вызвать ослепление. Поэтому требования к резкости светотеневой границы стандартного распределения силы света фар все время ужесточаются. Для удовлетворения этих требований современные производители фар применяют различные подходы (использование проекционных систем, матриц светодиодов и т. п.), но из-за отсутствия общепризнанных критериев эффективности и сильного различия дизайна транспортных средств конструкции получаются слишком тяжелыми, имеют малую надежность и ресурс и неэффективны в использовании энергии источника света. В данной статье приводится краткий обзор наиболее часто используемых конструкций головного освещения и способов формирования стандартного европейского континентального распределения силы света фар. На основе обзора выявляются основные проблемы широко используемых конструкций головного освещения и ставится задача по формулировке требований и рекомендаций по конструированию перспективных видов головного освещения транспортных средств.

Ключевые слова: головное освещение транспортного средства, распределение силы света, формирование распределения силы света, адаптивное автомобильное освещение

Для цитирования: Сернов, С. П. Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств. Часть 1: Стандартизация и основные применяемые конструкции головного освещения / С. П. Сернов, Д. В. Балохонов, Л. М. Коничева // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 1. С. 60–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-60-68>

Current State and Prospects for Development of Head Lighting for Vehicles

Part 1. Standardization and Generally Used Vehicle Headlamp Designs

S. P. Sernov, D. V. Balokhonov, L. M. Konicheva

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Open Joint Stock Company “Rudensk”, Testing Laboratory (Rudensk, Republic of Belarus)

Abstract. The main task of head lighting (headlights) of vehicles is to illuminate the road in front of it to ensure road safety. The design principles of vehicle headlights have remained unchanged for 50–60 years, but modern vehicles themselves differ

Адрес для переписки

Балохонов Дмитрий Валентинович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 155-12-24
balokhonov@bntu.by

Address for correspondence

Balokhonov Dmitry V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 155-12-24
balokhonov@bntu.by

significantly from their counterparts half a century ago. Modern cars are faster, have lower overall height and weight, which makes it difficult for drivers to ensure road safety at night: the driver needs to see farther in order to respond in time to changing traffic conditions, which is an indirect reason for the increase in headlight intensity. Due to the low landing, drivers are much more likely to be blinded by the headlights of passing and oncoming vehicles, which leads to traffic accidents. The distribution of the luminous intensity of headlights of vehicles (especially dipped beam headlights) has a sharp cut-off line, however, due to the high luminous intensity of the headlights and their low placement, even diffused light can cause blinding. Therefore, the requirements for the sharpness of the cut-off line of the standard headlight distribution are becoming more stringent all the time. To meet these requirements, modern headlight manufacturers use different approaches (the use of projection systems, LED matrices, etc.), but due to the lack of generally accepted efficiency criteria and the strong differences in vehicle design, the structures turn out to be too heavy, have low reliability and service life, and inefficient in using the energy of light source. This paper provides a brief overview of the most frequently used headlight designs and how to generate a standard European continental headlight distribution. Based on the review, the main problems of widely used head lighting designs are identified and the task is set to formulate requirements and recommendations for the design of promising types of head lighting for vehicles.

Keywords: vehicle headlights, luminous intensity distribution, shaping the distribution of light intensity, adaptive automotive lighting

For citation: Sernov S. P., Balokhonov D. V., Konicheva L. M. (2023) Current State and Prospects for Development of Head Lighting for Vehicles. Part 1: Standardization and Generally Used Vehicle Headlamp Designs. *Science and Technique*. 22 (1), 60–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-60-68> (in Russian)

Введение

В настоящее время скорость транспортных средств постоянно увеличивается, что заставляет водителей быстрее принимать решение о торможении или повороте. Поэтому границы освещенной области впереди транспортного средства должны быть как можно шире, а освещенность – выше [1]. Это особенно важно для фар ближнего света, которые должны обеспечить освещение области, находящейся непосредственно перед автомобилем и справа от него (для безопасности поворота направо и освещения обочины). Однако при увеличении размеров освещенной области и силы света фар вероятность ослепления водителей встречных транспортных средств значительно возрастает, что повышает риск дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [2]. Поэтому в настоящее время для уменьшения вероятности ослепления водителей встречных транспортных средств фары (особенно ближнего света) имеют стандартное распределение силы света с резкой светотеневой границей и строгим допуском на «размытие» светотеневой границы за счет рассеивания света, а также у них могут иметься адаптивные свойства, которые позволяют изменять распределение силы света фары в зависимости от обстановки на дороге. Однако современные конструкции головного освещения транспортных средств имеют ряд проблем, поиску решений которых посвящена данная статья.

Требования к головному освещению транспортных средств

В настоящее время рабочей группой по освещению ЕС ООН WP 29 практически завершена многолетняя работа по разработке требований, которые призваны заменить все предшествующие с учетом появившихся новых подходов к конструированию систем головного освещения транспортных средств с современными источниками света. В частности, предусмотрена новая маркировка фар с указанием различных источников света (галогенные лампы, светодиоды и т. п.), включены фары с горизонтальным распределением светового потока, используемые в США, что отражено в Правилах ООН № 149 (которые действуют в том числе и на территории Республики Беларусь) [3]. Основные категории и символика обозначений фар по новой классификации приведены в табл. 1 [3].

В соответствии с Правилами ООН № 149 распределения силы света фар ближнего света имеют вид, показанный: на рис. 1a – неадаптивных категорий C, HC; на рис. 1b – адаптивной категории XC.

Как видно из рис. 1, и у адаптивных, и у неадаптивных фар распределение силы света содержит ярко выраженную светотеневую границу (ломаная линия с началом в точке $-4L0H$, точкой перелома с координатами $0H0L$ и окончанием в точке $1,5R1,5H$). Именно она обеспечивает отсутствие ослепления у водителей встречных транспортных средств.

Таблица 1

Основные категории фар

Main categories of headlights

Огонь (функция) Lamp (function)	Символ (Symbol)	
Driving beam headlamp of Class A	Фара дальнего света класса А	R
Passing beam headlamp of Class A (asymmetrical)	Фара ближнего света класса А (асимметричный луч)	C
Driving beam headlamp of Class B	Фара дальнего света класса В	HR
Passing beam headlamp of Class B (asymmetrical)	Фара ближнего света класса В (асимметричный луч)	HC
Driving beam headlamp of Class D (GDL)	Фара дальнего света класса D (ГРЛ)	DR
Passing beam headlamp of Class D (GDL asymmetrical)	Фара ближнего света класса D (ГРЛ, асимметричный луч)	DC
Adaptive Front lighting System (AFS): basic passing beam	Адаптивная система переднего освещения (АСПО): базовый луч ближнего света	XC
Adaptive Front lighting System (AFS): motorway passing beam	Адаптивная система переднего освещения (АСПО): луч ближнего света для движения по автомагистрали	XCE
Adaptive Front lighting System (AFS): town passing beam	Адаптивная система переднего освещения (АСПО): луч ближнего света для движения в черте города	XCV
Adaptive Front lighting System (AFS): adverse weather passing beam	Адаптивная система переднего освещения (АСПО): луч ближнего света при неблагоприятных погодных условиях	XCW
Adaptive Front lighting System (AFS): driving beam	Адаптивная система переднего освещения (АСПО): луч дальнего света	XR
Passing beam headlamp of Class AS (symmetrical)	Фара ближнего света класса AS (симметричный луч)	C-AS
Passing beam headlamp of Class BS (symmetrical)	Фара ближнего света класса BS (симметричный луч)	C-BS
Passing beam headlamp of Class CS (symmetrical)	Фара ближнего света класса CS (симметричный луч)	WC-CS
Passing beam headlamp of Class DS (symmetrical)	Фара ближнего света класса DS (симметричный луч)	WC-DS
Passing beam headlamp of Class ES (GDL symmetrical)	Фара ближнего света класса ES (ГРЛ, симметричный луч)	WC-ES
Driving beam headlamp of Class BS	Фара дальнего света класса BS	R-BS
Driving beam headlamp of Class CS	Фара дальнего света класса CS	WR-CS
Driving beam headlamp of Class DS	Фара дальнего света класса DS	WR-DS
Driving beam headlamp of Class ES (GDL)	Фара дальнего света класса ES (ГРЛ)	WR-ES
Front fog lamp Class F3	Передняя противотуманная фара класса F3	F3
Cornering lamp	Огонь подсветки поворота	K

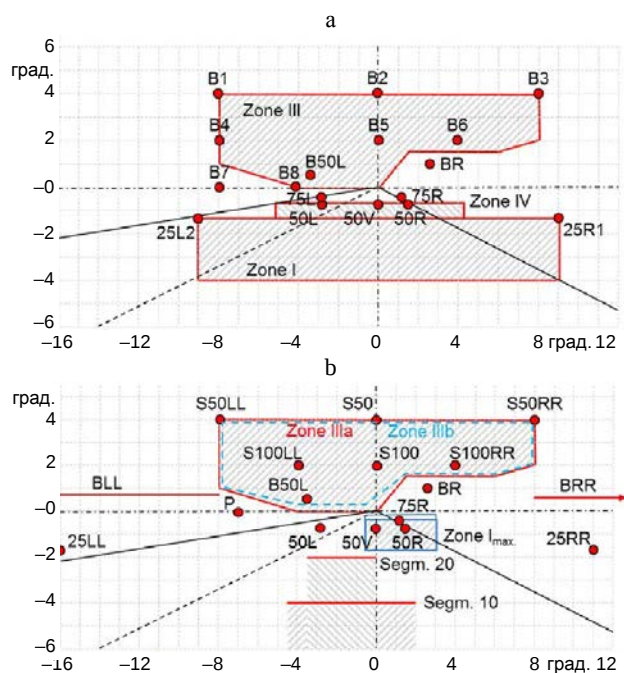


Рис. 1. Двумерное распределение силы света с контрольными точками для измерения распределения освещенности для фар ближнего света в соответствии с Правилами ООН № 149 (правостороннее движение): 1а – фары категории С, НС; 1б – адаптивное головное освещение категории ХС

Fig. 1. Two-dimensional luminous intensity distribution with reference points for measuring the illumination distribution for dipped-beam headlamps according to UN Regulations No 149 (right-hand traffic): 1a – headlights of C, HC category; 1b – adaptive head lighting of XC category

Вид данной границы в ночных условиях на дорожном полотне показан на рис. 2. Светотеневая граница показана линией белого цвета. Область, обозначенная «Дальний свет», является рабочей для фар дальнего света и приводится для сравнения.

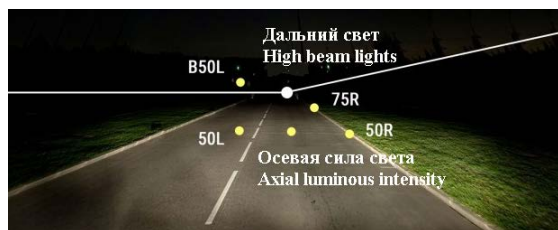


Рис. 2. Вид распределения освещенности на дороге из кабины водителя [4]

Fig. 2. Type of illumination distribution on the road from the driver's cab [4]

Из рис. 2 хорошо видно, что при резкой светотеневой границе ослепление встречных водителей маловероятно и возможно только при отражении от воды или льда на дорожном покрытии.

Проекция контрольных точек на дорожное покрытие приведена на рис. 3.

Из рис. 2 и 3 видно, что если граница света и тени сформирована не резко, часть света будет направлена выше горизонтали. Это является основной причиной ослепления водителей встречных транспортных средств, что обычно приводит к ДТП. Причиной нерезкой светотеневой границы является в основном дифракция, однако иногда светотеневая граница становится нечеткой из-за смещения источника света фары от проектного положения или неточности источника света (например, длинное тело накала лампы, линейка светодиодов с кристаллами сравнительно большого размера и/или несимметричной формы). Кроме того, целесообразным является дополнительное освещение обочины, в том числе при повороте транспортного средства, что нашло отражение в конструкции

адаптивных фар, поворачивающих свой луч вслед за поворотом руля транспортного средства.

Современные типовые конструкции головного освещения транспортных средств

Конструкции на основе ламп накаливания (ЛН) являются традиционными для транспортных средств [5]. В настоящее время ЛН наиболее распространены в качестве источника света для фар, особенно в бюджетном сегменте автомобилей и сельскохозяйственной техники, так как легко обеспечивают нужный световой поток и при этом сравнительно недорогие, несмотря на ресурс порядка 500 ч. Неточное тело накала делает невозможным формирование резкой светотеневой границы только за счет оптических деталей, поэтому применяют многонитевые ЛН, в которых предусмотрена шторка в верхней части лампы для затенения нижней части светового потока ЛН. За счет применения металлизированного или металлического рефлектора свет ЛН направляется на дорожное полотно (ниже горизонтали), что обеспечивает достаточно резкую светотеневую границу. Для дополнительной коррекции формы распределения силы света в данной конструкции может применяться внешний рассеиватель. Недостатком данного способа формирования распределения силы света являются потери светового потока от нити ближнего света, что при малом КПД ЛН приводит к низкой светоотдаче фары.

Время наработки до отказа ЛН также невелико (около 500 ч) и может уменьшаться от ударов, вибрационных воздействий и нестабильности напряжения в бортовой сети транспортного средства.

Галогенные ЛН используются в однопроводном варианте по принципу, показанному на рис. 4.

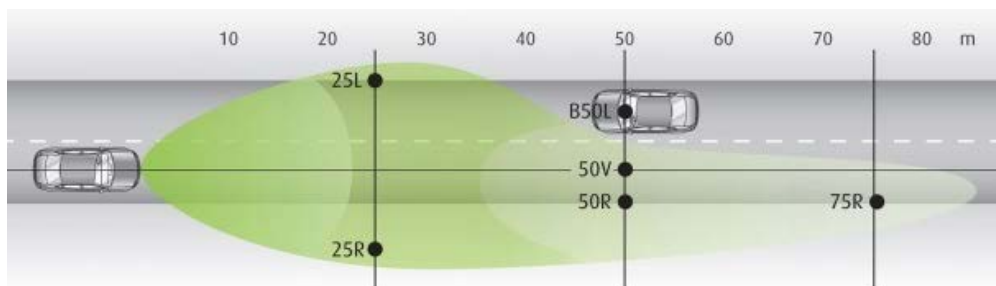
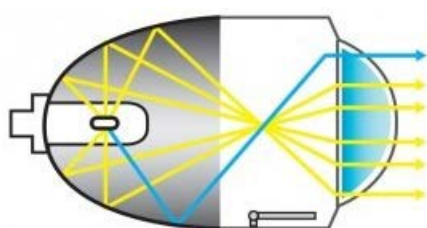
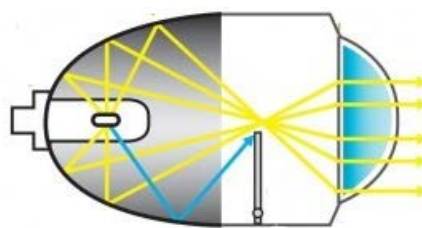


Рис. 3. Расположение точек измерения распределения освещенности на поверхности дороги [4]

Fig. 3. Location of measurement points for illumination distribution on the road surface [4]



Дальний свет включен, шторка опущена
High beam light is on, shutter is lowered



Ближний свет включен, шторка поднята
High beam light is on, shutter is lowered

Рис. 4. Конструкция фары с галогенной однопроводной лампой накаливания [4]

Fig. 4. Headlight design with halogen single-filament incandescent lamp [4]

В фарах с галогенными ЛН светонепроницаемая шторка для формирования светотеневой границы имеется внутри самой фары и управляется механически. Если шторка находится в верхнем положении, то фара работает в режиме ближнего света, если шторка не поднята – дальнего. В качестве деталей вторичной оптики применяются рефлектор, собирающий свет в пучок, и массивная линза, которая позволяет спроецировать светотеневую границу на дорогу. Таким образом, фара данной конструкции представляет собой проекционную систему, создающую на дороге изображение края шторки, которое повторяет стандартную светотеневую границу.

Недостатками данной конструкции являются потери светового потока (шторка его задерживает или рассеивает) и наличие движущихся деталей внутри фары, что уменьшает надежность фары (фара отказывает, если выходит из строя лампа, шторка или механизм для поднятия/опускания шторки). Из-за большой температуры галогеновой ЛН линза должна быть изготовлена из стекла, что увеличивает стоимость и массу фары. Также наблюдается выгорание рефлектора, что уменьшает силу света фары.

Данная конструкция известна достаточно давно, запатентовано множество ее типов (например, патент US 8029176 [6], выданный в 2011 г., который отличается специальной формой шторки для компенсации дифракции и уменьшения рассеивания света), но постоянно появляются новые (например, заявка на патент US 2013/0258695 [7], отличающаяся электродвигателем, способным не только поднимать и опускать шторку, но и вращать ее).

Таким образом, конструкции на основе ЛН не являются эффективным решением, так как

у них малая световая эффективность (из-за малого КПД источника) и большие потери, связанные с наличием неэффективно использующей свет шторки либо в источнике света, либо в фаре.

Конструкции на основе светоизлучающих диодов (СИД) отличаются от конструкций на основе ЛН в основном направленностью распределения силы света. Кроме того, светодиоды имеют лучшее люмен-ваттное соотношение, меньший размер и лучшую надежность по сравнению с ЛН. Прогнозируется, что мировой рынок светодиодных фар транспортных средств к 2024 г. увеличится на 2,34 млрд дол. США по сравнению с 2020 г. [8]

Для использования СИД в качестве источника света в фарах были созданы «эрзац-лампы накаливания», схема одной из которых приводится на рис. 5.

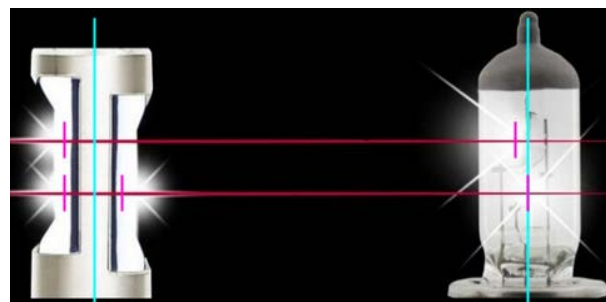


Рис. 5. Двухнитевая лампа накаливания (справа) и ее светодиодный аналог (слева). Положение источников света идентично у обеих конструкций

Fig. 5. Double-filament incandescent lamp (right) and its LED counterpart (left). The position of the light sources is identical for both designs

Такой подход позволяет заменять двухнитевые ЛН на СИД без изменения конструкции фар (англ. retrofit), так что основными деталями вторичной оптики в фаре остаются параболиче-

ский рефлектор, рассеиватель (линза) и экран для формирования светотеневой границы (он может быть установлен прямо на светодиод в «эрзац-лампе»). Серийные изделия такого типа в настоящее время выпускаются множеством фирм.

Недостатки такой конструкции являются суммой недостатков конструкций на основе ЛН и СИД: потери светового потока из-за наличия экрана, нерезкость границы свет – тень, чувствительность к перегреву (световой поток теряется на экране, поэтому ток инжекции СИД увеличивают и происходит перегрев), неточечность светящейся области. Кроме того, в спектре белого светодиода велика доля синего излучения от кристалла, и поэтому при проецировании в результате дисперсии край границы свет – тень будет синего цвета, что противоречит стандарту и приводит к более медленному восстановлению зрения у ослепленных встречных водителей.

Следует отметить, что водители склонны самостоятельно заменять галогеновые многонитевые ЛН на ксеноновые лампы или на отдельные СИД (кустарные СИД-модули) в фарах принадлежащих им транспортных средств, чтобы снизить потребление энергии и улучшить эффективность фар. Замена, как правило, производится кустарным способом, и поэтому источники света (СИД или ксеноновые лампы) не располагаются в идентичных нитях накала ЛН местах. Из-за этого переоборудованное таким образом головное освещение не только не соответствует требованиям, предъявляемым к распределению силы света, но и является источником опасности на дороге: его нерезкая светотеневая граница приводит к ослеплению водителей встречного и попутного транспорта. Дисперсия в таких самодельных конструкциях также значительно превышает стандартное значение, из-за чего при включенном дальнем свете цвет фары на расстоянии, превышающем 50 м, становится почти что синим, что приводит к более медленному восстановлению зрения у ослепленных водителей. Надежность «модифицированной» фары также понижается за счет некачественной кустарной герметизации корпуса фары после установки СИД или ксеноновых ламп. В настоящее время такая «модификация» головного освещения приобре-

ла характер эпидемии в Российской Федерации (несмотря на законодательный запрет и штрафы), а отдельные случаи отмечаются почти во всех странах с достаточно большой протяженностью магистральных дорог и наличием территорий, где контроль светотехнического оборудования транспортных средств не производится или производится нерегулярно (Китай, США, страны Южной Америки и др.). Кроме этого, сообщается о некачественно выполненной проводке таких фар, что неизбежно ведет за собой понижение надежности [9].

Для ликвидации присущих ЛН недостатков создана фара модульной конструкции, в каждом модуле которой имеется отдельный СИД в качестве источника света и шторка, которая практически повторяет конструкцию с галогеновой ЛН (рис. 6).

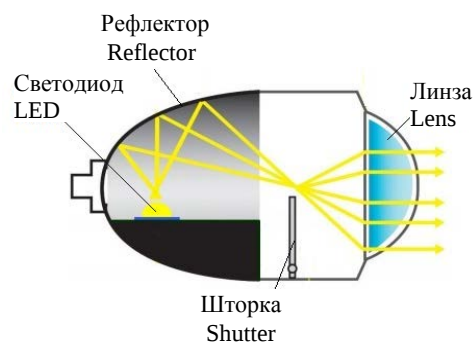


Рис. 6. Конструкция светодиодной фары со шторкой [4]

Fig. 6. LED headlight with shutter [4]

Данная конструкция также представляет собой проекционную систему, создающую на проезжей части дороги изображение края шторки, которое и является светотеневой границей. Так как требования по силе света фар достаточно высоки, светодиод работает при большом токе инжекции, что приводит к его нагреву, последующей деградации его светового потока и уменьшению времени наработки до отказа. Чтобы избежать излишнего нагрева, СИД охлаждают активно (с помощью вентилятора, элементов Пельтье и др.), что приводит к уменьшению надежности фары в целом: при отказе системы охлаждения (время наработки до отказа около 5000 ч) светодиод быстро перегревается и выходит из строя. Образцы серийно выпускаемых светодиодных модулей такой конструкции показаны на рис. 7.



Рис. 7. Серийные модули фар ближнего света на основе светодиодов с принудительным охлаждением (слева направо): Lumisfera – Wide, i-Lens, Lumisfera – Far [4]

Fig. 7. Standard low-beam headlight modules based on forced-cooled LEDs (from left to right): Lumisfera – Wide, i-Lens, Lumisfera – Far [4]

Кроме того, при высокой рабочей температуре рефлекторы из металлизированного пластика (или алюминия) быстро окисляются, снижается их коэффициент отражения, что приводит к уменьшению силы света фары. Линзы светодиодных фар описываемой конструкции изготавливают методом литья из массива стекла (что делает линзу дорогой и тяжелой) либо из массива полимера, что является приемлемым по массе и цене, но не позволяет точно соблюсти форму линзы из-за усадки при литье.

Из-за наличия в излучении светодиода ультрафиолетовой составляющей и повышенной температуры фары полимер линзы деградирует, линза постепенно желтеет и может разрушиться. Наличие в белом свете светодиода большой доли синего излучения приводит к «посинению» светотеневой границы, из-за чего при ослеплении у водителей встречного транспорта медленнее восстанавливается зрение. Следует отметить, что дисперсия (зависимость координат цветности от направления наблюдения, цветовой растр) обусловлена в основном наличием монолитной линзы, показатель преломления материала которой зависит от длины волны излучения. Если отойти от конструкции на базе проекционной оптики, т. е. применить не изображающую деталь вторичной оптики, то можно существенно уменьшить дисперсию за счет использования светового потока из нескольких областей распределения силы света светодиода для формирования центральной области распределения силы света модуля.

Достоинства светодиодных модулей следующие:

- можно встраивать в конструкцию новых фар или заменять ими штатные источники света в существующих фарах, если размер фары это позволяет;
- имеют лучший КПД, чем ЛН, что позволяет экономить энергию, особенно при стоянке транспортного средства с заглушенным двигателем, кроме того, улучшается баланс в бортовой сети транспортного средства;
- светодиоды способны прослужить около 10000 ч даже при больших токах инжекции и высоких температурах (если система активного охлаждения работает штатно).

Прогресс в области разработки светодиодных модулей не останавливается, регулярно патентуются новые конструкции, например патент US 9482404 [10], в котором представлена конструкция с разделенными источниками света, причем эти источники развернуты друг относительно друга на 180°, что позволяет использовать один источник для реализации функции дальнего света, а другой – ближнего, так что лучи этих источников даже не пересекаются. Конструкция предусматривает возможность совместного использования источников света разного типа (рис. 8).

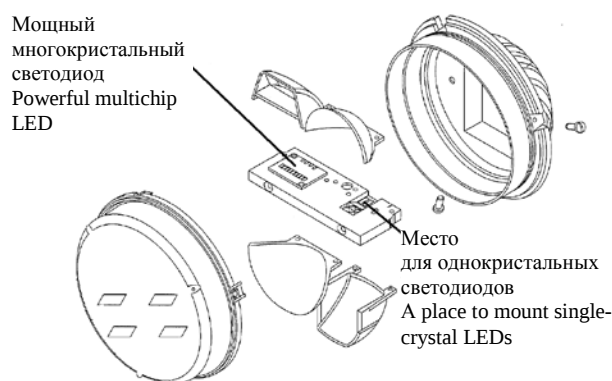


Рис. 8. Конструкция модуля фары в соответствии с патентом US 9482404. Предусмотрено использование разнотипных источников света

Fig. 8. Headlight module design in accordance with US 9482404 patent. Light sources of different types can be used

На рис. 8 изображен модуль фары, в котором на общем основании в одном корпусе расположен мощный многокристалльный светодиод

для обеспечения дальнего света и предусмотрено место для установки одного или нескольких однокристалльных светодиодов для обеспечения ближнего света. Это может обеспечить более экономное потребление энергии при передвижении по ровным участкам дороги за счет использования светодиодного дальнего света, а при необходимости включения ближнего света позволяет воспользоваться однокристалльными светодиодами, которые не так сильно нагреваются при работе и поэтому могут дать лучший световой поток на единицу потребленной мощности.

ВЫВОДЫ

1. Основной целью всех широко применяемых подходов к конструированию фар транспортных средств является формирование резкой светотеневой границы с малым размытием для обеспечения безопасности дорожного движения путем предотвращения ослепления его участников при сохранении достаточной освещенности проезжей части на заданной дистанции перед транспортным средством.

2. Распространенные конструкции головного освещения не всегда способны сформировать резкую светотеневую границу, соответствующую требованиям современных международных стандартов. Это означает, что при наличии прогресса в области автомобилестроения и последующем увеличении средней скорости транспортных средств фары текущей конструкции не смогут удовлетворять требованиям следующих версий международных стандартов. Это будет происходить не столько из-за применения неподходящего и неэффективного с точки зрения преобразования энергии источника света, сколько из-за конструкции головного освещения, текущие варианты которой не учитывают особенности современных и перспективных источников света.

3. Таким образом, актуальной является задача по дальнейшему анализу перспективных конструкций головного освещения транспортных средств для выработки требований к ним, а также рекомендаций по их конструированию

и применению не только в условиях современных стандартов, но и с учетом прогресса в области автомобиле-, приборостроения и светотехники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Daytime Running Lights for Motorcycles [Electronic Resource] / M. Paine [et al.] // Optusnet. 2010. Mode of access: http://members.optusnet.com.au/carsafety/esv19_paine_mc_drl.pdf. Date of access: 10.05.2022.
2. Larson, M. V. The Dangers of Overly Bright Headlights at Night [Electronic Resource] / M. V. Larson // Larson Law Firm P.C. 2021. Mode of access: <https://ndakotalaw.com/the-dangers-of-overly-bright-headlights-at-night>. Date of access: 01.09.2022.
3. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which Can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation No 149. Uniform Provisions Concerning the Approval of Road Illumination Devices (Lamps) and Systems for Power-Driven Vehicles [Electronic Resource] // UNECE. 2019. Mode of access: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf>. Date of access: 10.05.2022.
4. Казанцев, С. Тест 8 светодиодных линз, часть № 2 [Электронный ресурс] / С. Казанцев // Светодиодные лампы для авто. Тесты, обзоры, отзывы, сравнения. 2017. Режим доступа: <http://led-obzor.ru/test-8-svetodiodyih-linz-chast-2>. Дата доступа: 10.05.2022.
5. Sabhadiya, J. 7 Types Of Headlights With Their Pros and Cons [Electronic Resource] / J. Sabhadiya // Engineering Choice. 2021. Mode of access: <https://www.engineeringchoice.com/author/jigneshsabhadiya/>. Date of access: 02.09.2022.
6. Vehicle Headlight Capable of Compensating for Light Intensity of Dark Region [Electronic Resource]: Pat. US 8029176 B2 / Ming-Jhih Shih. Publ. Date 4.10.2011. Mode of access: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3e/a1/87/b3eaf1b113cdba/US8029176.pdf>. Date of access: 10.05.2022.
7. Automotive Headlamp [Electronic Resource]: pat. US 2013/0258695 / H. Yamazaki, N. Minakawa, S. Yokoi. Publ. Date 03.10.2013. Mode of access: <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/21/7f/4f80334391ad5b/US20130258695A1.pdf>. Date of access: 10.05.2022.
8. Maida, J. Automotive LED Headlamps Market by Application (Passenger Cars, Commercial Vehicles, and Others) and Geography (APAC, North America, Europe, South America, and MEA) – Forecast and Analysis 2020–2024 [Electronic Resource] / J. Maida // Technavio. 2022. Mode of access: [https://www.technavio.com/report/automotive-led-headlamps-market-industry-analysis?utm_source=prnewswire&utm_medium=pressrelease&utm_campaign=T50\(DCVO\)_report_wk29_2022_006&utm_content=IRTNTR40893](https://www.technavio.com/report/automotive-led-headlamps-market-industry-analysis?utm_source=prnewswire&utm_medium=pressrelease&utm_campaign=T50(DCVO)_report_wk29_2022_006&utm_content=IRTNTR40893). Date of access: 01.09.2022.

9. Hitch, J. Giving LEDs some TLC: Inspection and Diagnostic Best Practices [Electronic Resource] / J. Hitch // Fleet Maintenance. 2022. Mode of access: <https://www.fleetmaintenance.com/equipment/battery-and-electrical>. Date of access: 01.09.2022.
10. LED Reflector Optic for an Automotive Headlight [Electronic Resource]: Pat. US 9482404 / J. P. Peck, C. D. Thomas, F. J. Natividad. Publ. Date 01.11.2016. Mode of access: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6b/4d/b6/b040df43f91ec3/US9482404.pdf>. Date of access: 10.05.2022.

Поступила 31.08.2022

Подписана в печать 08.11.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Paine M., Paine D., Haley J., Cockfield S. (2010) Day-time Running Lights for Motorcycles. *Optusnet*. Available at: http://members.optusnet.com.au/carsafety/esv_19_paine_mc_drl.pdf (accessed 10 May 2022).
2. Larson M. V. (2021) The Dangers of Overly Bright Headlights at Night. *Larson Law Firm P.C.* Available at: <https://ndakotalaw.com/the-dangers-of-overly-bright-headlights-at-night> (accessed 1 September 2022).
3. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation No 149. Uniform Provisions Concerning the Approval of Road Illumination Devices (Lamps) and Systems for Power-Driven Vehicles. *UNECE* (2019). Available at: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf> (accessed 10 May 2022).
4. Kazantsev S. (1017) Test 8 LED Lenses, Part 2. *LED Lamps for Cars. Test, Reviews, Feedback, Comparisons*.

Available at: <http://led-obzor.ru/test-8-svetodiodnyih-linz-chast-2> (accessed 10 May 2022) (in Russian).

5. Sabhadiya J. (2021) 7 Types of Headlights with Their Pros and Cons. *Engineering Choice*. Available at: <https://www.engineeringchoice.com/author/jigneshsabhadiya/> (accessed 2 September 2022).
6. Ming-Jhih Shih (2011) *Vehicle Headlight Capable of Compensating for Light Intensity of Dark Region*. Patent US 8029176 B2. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3e/a1/87/b3eaf1b113cdba/US8029176.pdf> (accessed 10 May 2022).
7. Yamazaki H., Minakawa N., Yokoi S. (2013) *Automotive Headlamp*. Patent US 2013/0258695. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/21/7f/4f80334391ad5b/US20130258695A1.pdf> (accessed 10 May 2022).
8. Maida J. (2022) Automotive LED Headlamps Market by Application (Passenger Cars, Commercial Vehicles, and Others) and Geography (APAC, North America, Europe, South America, and MEA) – Forecast and Analysis 2020–2024. *Technavio*. Available at: [https://www.technavio.com/report/automotive-led-headlamps-market-industry-analysis?utm_source=prnewswire&utm_medium=pressrelease&utm_campaign=T50\(DCVO\)_report_wk29_2022_006&utm_content=IRTNTR40893](https://www.technavio.com/report/automotive-led-headlamps-market-industry-analysis?utm_source=prnewswire&utm_medium=pressrelease&utm_campaign=T50(DCVO)_report_wk29_2022_006&utm_content=IRTNTR40893) (accessed 1 September 2022).
9. Hitch J. (2022) Giving LEDs some TLC: Inspection and Diagnostic Best Practices. *Fleet Maintenance*. Available at: <https://www.fleetmaintenance.com/equipment/battery-and-electrical> (accessed 1 September 2022).
10. Peck J. P., Thomas C. D., Natividad F. J. (2016) *LED Reflector Optic for an Automotive Headlight*. Patent US 9482404 Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6b/4d/b6/b040df43f91ec3/US9482404.pdf> (accessed 10 May 2022).

Received: 31.08.2022

Accepted: 08.11.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-69-78>

УДК 332.1

Теоретико-методическое обоснование оценки и развития логистической инфраструктуры

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть¹⁾, канд. техн. наук, доц. П. В. Попов²⁾,
канд. экон. наук, доц. П. И. Лапковская¹⁾, канд. ист. наук, доц. С. В. Прокопов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Волгоградский филиал Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова
(Волгоград, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье представлены результаты исследования в области теоретико-методического обоснования оценки и развития логистической инфраструктуры, которая может функционировать на различных уровнях, в том числе на региональном и национальном. Проведенный анализ позволил разделить все методы оценки на две группы: основанные на экспертных оценках и основанные на количественных данных. В качестве экспертных методов оценки логистической инфраструктуры были исследованы такие международные подходы, как индекс LPI (Logistics Performance Index); индекс глобальной конкурентоспособности; индекс конкурентоспособности путешествий и туризма TTCI (Travel & Tourism Competitiveness Index), где в субиндекс «Инфраструктура» входят индикаторы, относящиеся и к основной составляющей логистической инфраструктуры (связанные с деятельностью воздушного и железнодорожного транспорта, а также качеством воздушной и наземной инфраструктуры), и к обеспечивающей (количество гостиничных номеров, компаний по аренде автомобилей, банкоматов), а также ежегодный рейтинг Всемирной конкурентоспособности стран мира (IMD World Competitiveness Ranking); индекс вовлеченности стран в международную торговлю (ETI); методика оценки качества транспортной инфраструктуры, разработанная Министерством транспорта РФ в рамках программы «Развитие транспортной системы». Исследования показали, что имеется немного работ с применением количественных методов оценки логистической инфраструктуры, например: методика комплексной оценки транспортной инфраструктуры региона А. М. Кудрявцева и Л. Н. Рудневой, методика многоуровневой оценки развития транспортной инфраструктуры Ю. В. Катаевой, методика оценки привлекательности логистической инфраструктуры региона для размещения ключевых объектов складской и транспортной сети А. Н. Рахмангулова и О. А. Копыловой, исследования F. Carlucci. При разработке планов развития логистической инфраструктуры предлагается использовать существующие подходы, объединяя экспертные и количественные методы оценки.

Ключевые слова: логистическая инфраструктура, методическое обоснование, оценка, развитие, экспертные методы, количественные методы

Для цитирования: Теоретико-методическое обоснование оценки и развития логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 69–78. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-69-78>

Адрес для переписки

Ивуть Роман Болеславович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Ivut Roman B.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

Theoretical and Methodological Substantiation of the Assessment and Development of Logistics Infrastructure

R. B. Ivut¹⁾, P. V. Popov²⁾, P. I. Lapkovskaya¹⁾, S. V. Prokopov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Volgograd Branch of the Russian Economic University named after G. V. Plekhanov
(Volgograd, Russian Federation)

Abstract. The paper presents the research results in the field of theoretical and methodological substantiation of the assessment and development of a logistics infrastructure that can operate at various levels, including regional and national. The analysis carried out has made it possible to divide all assessment methods into two groups: those based on expert assessments and those based on quantitative data. As expert methods for assessing the logistics infrastructure, such international approaches were studied as LPI index (Logistics Performance Index); global competitiveness index; TPCI index (Travel & Tourism Competitiveness Index), where “Infrastructure” subindex includes indicators related to both the main component of the logistics infrastructure (related to the activities of air and rail transport, as well as the quality of air and ground infrastructure), and to the supporting one (number of hotel rooms, car rental companies, ATMs), as well as the annual rating of World competitiveness of the countries of the world (IMD World Competitiveness Ranking); index of involvement of countries in international trade (ETI); methodology for assessing the quality of transport infrastructure, developed by the Ministry of Transport of the Russian Federation within the framework of the program “Development of the transport system”. Studies have shown that there are few works using quantitative methods for assessing the logistics infrastructure, for example: a method for a comprehensive assessment of the transport infrastructure of a region by A. M. Kudryavtsev and L. N. Rudneva, Yu. V. Kataev’s method for a multi-level assessment of the development of transport infrastructure, methodology for assessing the attractiveness of the region’s logistics infrastructure for accommodating key objects of the warehouse and transport network developed by A. N. Rakhmangulov and O. A. Kopylova, researches of F. Carlucci. While preparing plans for the development of logistics infrastructure, it is proposed to use existing approaches, combining expert and quantitative assessment methods.

Keywords: logistics infrastructure, methodological justification, assessment, development, expert methods, quantitative methods

For citation: Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Prokopov S. V. (2023) Theoretical and Methodological Substantiation of the Assessment and Development of Logistics Infrastructure. *Science and Technique*. 22 (1), 69–78. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-69-78> (in Russian)

Введение

Логистическая инфраструктура представляет собой систему взаимосвязанных между собой элементов, которые должны обеспечивать качественное функционирование транспортных, складских, информационных подсистем. К наиболее известным объектам логистической инфраструктуры относят складские комплексы, логистические центры, хабы, погрузочно-разгрузочные терминалы и другие объекты, которые позволяют обеспечить доставку и обработку материальных ценностей и готовой продукции с доведением их к потребителю. Для эффективного планирования и развития логистической инфраструктуры необходимо комплексно исследовать и применять различные подходы и методики ее оценки, которые разработаны международными и отечественными экспертами.

Основная часть

Все методы оценки логистической инфраструктуры условно можно разделить на две большие группы: основанные на экспертных оценках [1–6] и основанные на количественных данных [7–12]. Наиболее известным международным рейтингом, позволяющим оценить эффективность логистики стран, в том числе и логистической инфраструктуры, является индекс LPI (Logistics Performance Index) [1], публикуемый Всемирным банком. Исходной информацией для расчета индекса являются результаты опроса руководителей международных логистических провайдеров, представителей малых и средних транспортно-экспедиторских фирм, а также специалистов в области логистики.

Опрос проводится по шести критериям, шкала пятибалльная (максимальный балл пять):

– «таможня» – эффективность прохождения таможенных процедур;

– «инфраструктура» – качество транспортной и информационной составляющей логистической инфраструктуры;

– «отгрузки» – непринужденность экспортных отгрузок;

– «качество логистики и компетентность» – уровень компетентности специалистов по логистике местного рынка;

– «контроль» – способность отслеживать поставки;

– «своевременность» – обязательность и надежность местных контрагентов.

Каждый респондент оценивает восемь зарубежных рынков. Выбор стран для оценивания зависит от географического положения госу-

дарства респондента и среднего уровня дохода на одного жителя (табл. 1) [1].

Полученные в результате опроса данные нормализуются с помощью метода z-оценок и обрабатываются с применением метода главных компонент (PCA). Индекс LPI по каждой стране рассчитывается по формуле

$$LPI = \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 + \alpha_3 K_3 + \alpha_4 K_4 + \alpha_5 K_5 + \alpha_6 K_6, \quad (1)$$

где $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – нормализованные баллы критериев «таможня», «инфраструктура», «отгрузки», «качество логистики и компетентность», «контроль», «своевременность» соответственно; $\alpha_1 \dots \alpha_6$ – веса критериев «таможня» (0,4072), «инфраструктура» (0,4130), «отгрузки» (0,3961), «качество логистики и компетентность» (0,4166), «контроль» (0,4106), «своевременность» (0,4056) соответственно.

Таблица 1

Выбор зарубежных рынков для оценки
Selection of foreign markets for evaluation

Респондент	Средний уровень дохода жителей страны респондента		
	Низкий	Средний	Высокий
Из стран, имеющих выход к морю	Пять наиболее важных стран-партнеров по экспорту + три наиболее важные страны-партнера по импорту	Три самые важные страны-партнера по экспорту + самая важная страна-партнер по импорту + четыре страны случайным образом, по одной из каждой группы стран: – Африка; – Восточная и Центральная Азия; – Латинская Америка; – Европа, за вычетом Центральной Азии и ОЭСР	Две страны случайным образом из списка пяти наиболее важных стран-партнеров по экспорту и пяти наиболее важных стран-партнеров по импорту + четыре страны случайным образом, по одной из каждой группы стран: – Африка; – Восточная и Центральная Азия; – Латинская Америка; – Европа, за исключением Центральной Азии и ОЭСР, + две страны случайным образом из объединенных групп стран
Из стран, не имеющих выхода к морю	–	Три наиболее важные страны-партнера по экспорту + наиболее важная страна-партнер по импорту + две транзитные страны + две страны случайным образом, по одной из каждой группы стран: – Африка, Восточная и Центральная Азия, Латинская Америка; – Европа, за вычетом Центральной Азии и ОЭСР	

К международным рейтингам, позволяющим в том числе оценить эффективность логистической инфраструктуры государств, относится индекс глобальной конкурентоспособности (Global Competitiveness Index, GCI 4.0) [2]. Исходной информацией для его расчета являются качественные и количественные показатели, объединенные в 12 групп. Общее количество индикаторов 98, из которых 44 представляют собой качественные данные.

Качественные данные собираются с помощью опроса участников Международного экономического форума руководителей международных логистических провайдеров, представителей малых и средних транспортно-экспедиторских фирм, а также специалистов в области логистики. В группу «инфраструктура» входят индикаторы, связанные с качеством дорожной сети, авиатранспортных и портовых услуг, железнодорожных перевозок, доступом населения к электричеству и качественной питьевой воде. Шкала измерения для показателей различна. Часть измеряется по семибалльной шкале, часть по столбалльной. Кроме этого, в группу входит количественный индикатор «плотность железных дорог».

На следующем этапе дается оценка каждой группе показателей как среднее арифметическое баллов индикаторов, в нее входящих. Общий балл индекса глобальной конкурентоспособности 4.0 (GCI) представляет собой среднее значение по двенадцати группам.

Третий международный индекс оценки логистической инфраструктуры страны – индекс конкурентоспособности путешествий и туризма TTCI (Travel & Tourism Competitiveness Index). Структура индекса представляет собой 90 индикаторов, распределенных в четырнадцать интегрированных показателей, которые, в свою очередь, сгруппированы в четыре субиндекса («благоприятная среда», «политика и создание благоприятных условий в индустрии Т&Т», «инфраструктура», «природные и культурные ресурсы»).

В субиндекс «инфраструктура» входят индикаторы, относящиеся как к основной составляющей логистической инфраструктуры (свя-

занные с деятельностью воздушного и железнодорожного транспорта, качеством воздушной и наземной инфраструктуры), так и обеспечивающей («количество гостиничных номеров», «количество компаний по аренде автомобилей», «количество банкоматов»). Часть индикаторов рассчитывается на основе данных, полученных в результате опроса участников Всемирного экономического форума. Шкала измерения семибалльная (наивысшая оценка семь баллов). Исходя из того, что данные представлены в разных шкалах, все показатели нормализуются по формуле

$$score_{i,c} = \frac{value_{i,c} - wp_i}{frontier_i - wp_i} \cdot 100, \quad (2)$$

где $value_{i,c}$ – исходное значение признака; $frontier_i$ – наибольшее значение признака; wp_i – наименьшее значение для данного показателя в выборке.

Индекс TTCI рассчитывается как среднее арифметическое четырех субиндексов. Каждый из субиндексов – как средневзвешенное соответствующих интегрированных показателей.

Ежегодный рейтинг Всемирной конкурентоспособности стран мира (IMD World Competitiveness Ranking) публикует швейцарский Институт менеджмента (Institute of Management Development, IMD) [4]. В рейтинг включены 64 страны, которые отобраны на основе наличия статистических достоверных и сопоставимых данных. В качестве данных используются как результаты опроса руководителей крупных корпораций, аналитиков, так и статистические данные международных организаций (ООН, ВТО, МВФ и др.). Рейтинг включает в себя 334 критерия, объединенных в двадцать показателей, которые, в свою очередь, сгруппированы в четыре субиндекса: «состояние экономики», «эффективность правительства», «состояние деловой среды», «инфраструктура» [4].

Субиндекс «инфраструктура» состоит из пяти показателей. В показатель «базовая инфраструктура» включены критерии, связанные

с имеющимися земельными ресурсами, демографией, наличием и эффективностью использования водных ресурсов, уровнем развития транспортной и энергетической инфраструктур. В показатель «технологическая инфраструктура» входят критерии, связанные с информационной инфраструктурой («инвестиции в ИКТ», «количество ЭВМ на душу населения», «скорость Интернета», «экспорт услуг ИКТ» и др.), в параметр «научная инфраструктура» – критерии, связанные с НИОКР («объем инвестиций», «количество сотрудников», «количество патентов на интеллектуальную собственность» и др.). Показатель «здоровье и окружающая среда» включает данные по расходам на здравоохранение и окружающую среду, средней продолжительности жизни, обеспеченности питьевой водой, параметр «образование» – «расходы на образование», «процент людей, имеющих высшее образование», «соотношение учителей и учеников», «мобильность студентов», «знание английского языка» и др.

Исходя из того, что критерии представлены в разных шкалах, они нормализуются по формуле [4]

$$STD = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (3)$$

где x_i – значение переменной; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение выборки; σ – стандартное отклонение выборки.

Каждый показатель рассчитывается как среднее значение входящих в него критериев, а субиндекс – как среднее значение входящих в него показателей. Рейтинг Всемирной конкурентоспособности (WCY) для страны рассчитывается как сумма произведений значений субиндекса на его вес. Значение веса одинаково для всех субиндексов.

К крупным международным рейтингам, представляющим оценку транспортной инфраструктуры, следует отнести индекс вовлеченности стран в международную торговлю (ETI). Он позволяет оценить, насколько эффективно экономические и политические институты страны способствуют свободному перемещению товаров через границу [5].

Рейтинг включает в себя 57 показателей, которые объединены в семь индикаторов, сгруппированных в четыре субиндекса: «доступ к рынку», «административное управление на границах», «транспортная и коммуникационная инфраструктура» и «деловой климат».

В субиндекс «транспортная и коммуникационная инфраструктура» входят три индикатора, включающих двадцать показателей:

– «доступность и качество транспортной инфраструктуры» (оценка имеющейся автомобильной, железнодорожной, воздушной и портовой инфраструктуры);

– «доступность и качество транспортных услуг» (в том числе количество логистических компаний, эффективность почтовых услуг);

– «доступность и качество ИКТ» (оценка работы сотовой сети и Интернета, правительственных онлайн-сервисов, а также возможность использования ИКТ для деловых операций).

Исходными данными для расчета индекса являются результаты опроса участников Всемирного экономического форума, а также значения, взятые из отчетов Global Express Association, конференции Организации Объединенных Наций по торговле и развитию, Всемирного банка и др. Каждый показатель участниками форума оценивается по семибальной шкале. Приведение исходных данных в единую шкалу измерения производится по формуле (2). Значение индикатора вычисляется как среднее арифметическое показателей, субиндекса и индекса – как сумма произведений веса индекса/субиндекса на его значение.

Необходимо отметить и российскую методику оценки качества транспортной инфраструктуры, разработанную Министерством транспорта РФ в рамках программы «Развитие транспортной системы» [6]. Индекс качества транспортной инфраструктуры рассматривается как интегральный показатель, отражающий изменение состояния инфраструктуры транспортного комплекса по отношению к заданному периоду. Он рассчитывается как сумма произведения индексов качества инфраструктуры всех видов транспорта на объемы их транспортной работы. Количественное зна-

чение индексов предполагается определять на основе экспертного опроса специалистов в области транспорта по вопросам, связанным с уровнем развития объектов транспортно-логистической инфраструктуры.

Несмотря на известность и широкое использование данных индексов для оценки основной и обеспечивающей составляющих логистической инфраструктуры стран, необходимо отметить, что представленные методики основаны на данных опросов, а это не исключает субъективности полученных результатов.

Анализ научной литературы показал незначительное количество работ, в которых предлагаются количественные методы оценки основной и обеспечивающей составляющих логистической инфраструктуры [7–12]. Большая часть исследований отнесена к оценке региональной транспортной инфраструктуры [7–9, 11, 12].

В [7] предложена методика комплексной оценки транспортной инфраструктуры региона, которая включает: 1) определение характеризующих ее показателей; 2) ее оценку.

В рамках методики показатели развития транспортной инфраструктуры региона авторами объединены в три группы: производственная (показатели уровня обслуживания, плотность транспортной сети, развитие предпринимательства), социальная (транспортная подвижность, транспортная дискриминация населения, коэффициент Энгеля) и общерегиональная (коэффициент Успенского, грузо- и пассажиронапряженность, доля инвестиций в транспортную инфраструктуру). Для проведения исследования выбираются параметры в зависимости от вида транспортного средства. Далее на основе метода экспертных оценок оценивается значимость каждого показателя.

После выбора показателей рассчитываются их количественные значения, а затем общий показатель развития транспортной инфраструктуры региона по формуле

$$\overline{R}_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} w_j + \sum_{j=1}^n R'_{ij} w_j, \quad (4)$$

где R_{ij} , R'_{ij} – единичные показатели развития транспортной инфраструктуры по j -му оценоч-

ному параметру; w_j – коэффициент значимости показателя.

Методика многоуровневой оценки развития транспортной инфраструктуры, которая предполагает расчет интегрального показателя, основанного на значениях его факторных показателей (материально-технических, потребительско-демографических, производственных, финансовых, институциональных и негативных), предложена в [8].

К материально-техническим факторам авторы относят показатели, связанные с работой грузового и пассажирского транспорта и с имеющейся транспортной инфраструктурой (плотность и протяженность автомобильных, железных, трамвайных дорог, водных путей сообщения). Потребительско-демографические факторы позволяют сделать вывод об объеме оказанных транспортных услуг населению и численности работников, занятых в сфере транспорта. Негативные факторы учитывают количество ДТП и пострадавших в них, производственные – наличие строительных машин и обеспеченность строительства материалами, финансовые – объем бюджетных средств и инвестиций в транспортную инфраструктуру. Институциональные факторы включают показатель «Число организаций, осуществляющих деятельность по виду экономической деятельности «Транспорт»».

Расчет интегрального показателя развития транспортной инфраструктуры включает три шага [8]. На первом проводится корреляционно-регрессионный анализ, в рамках которого определяются параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на социально-экономические данные региона. На втором шаге рассчитываются значения факторных показателей

$$\Phi\Pi_i = \sum_{k=1}^m \beta_k \text{ЧП}_k, \quad (5)$$

где β_k – вес k -го частного показателя; ЧП_k – коэффициент корреляционно-регрессионного анализа для k -го частного показателя k -го фактора.

На последнем шаге определяется интегральный показатель развития транспортной составляющей логистической инфраструктуры региона

$$\text{ТП} = \sum_{j=1}^n \gamma_j \Phi \Pi_j, \quad (6)$$

где γ_j – вес j -го факторного показателя.

Вес частного и факторного показателя автотранспорта методики предлагается рассчитывать с помощью метода экспертных оценок. В качестве недостатка данной методики можно отметить отсутствие проверки исходных данных на избыточность и мультиколлинеарность.

Оценка привлекательности логистической инфраструктуры региона для размещения ключевых объектов складской и транспортной сети предложена в [9]. Методика основана на расчете интегрированной оценки, учитывающей три группы факторов: географические, инфраструктурные и показатели транспортной работы. К первой отнесены показатели, связанные с географическим месторасположением региона и близостью к международным транспортным коридорам, ко второй – связанные с состоянием транспортных коммуникаций и наличием свободных провозных мощностей. Расчет интегрального показателя для оценки привлекательности региональной логистической инфраструктуры проводится по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2}{3}}, \quad (7)$$

где K_1^2 , K_2^2 , K_3^2 – консолидированные коэффициенты групп факторов: географических, инфраструктурных и транспортной работы соответственно.

Необходимо отметить, что в данной методике учитывается только транспортная составляющая логистической инфраструктуры. Кроме этого, вызывает сомнение необходимость учета принадлежности региона к климатической зоне.

Среди зарубежных методик оценки логистической инфраструктуры региона следует выделить работу [10], где предложена методика оценки логистической инфраструктуры для областей и районов Италии, основанная на расче-

те интегрального показателя АСИТ. Исходными данными для расчета АСИТ являются показатели, имеющие отношение как к основной, так и к обеспечивающей составляющей логистической инфраструктуры [10].

Для оценки логистической инфраструктуры областей к основной составляющей отнесены показатели, характеризующие работу автомобильного, железнодорожного, воздушного и водного транспорта (объем перевозок пассажиров и грузов). Обеспечивающая представлена стоимостью расположенных на территории логистических объектов, количеством транспорта (пассажирского и грузового) и специалистов по логистике. Если оценивается уровень развития логистической инфраструктуры районов, то используются показатели грузооборота всех видов транспорта, а также количество портов и объем инвестиций в человеческий капитал.

Для расчета АСИТ осуществляется нормализация исходных данных по (3). Далее вычисляются индексы для каждого вида транспорта как средневзвешенное объемов транспортной работы. Значение интегрального показателя АСИТ определяют по выражению

$$ACIT = \sum_{q=1}^Q w_q I_q, \quad (8)$$

где w_q – значимость q -го индекса; I_q – значение индекса.

В [10] значимость принята одинаковой для каждого индекса. Кроме этого, предложено определять ее экспертным путем или методом весовых характеристик. Также приведена методика оценки логистической инфраструктуры региона, алгоритм которой представлен на рис. 1.

Данный алгоритм предусматривает формирование базы данных, включающей характеристики основной и обеспечивающей составляющих логистической инфраструктуры за заданный интервал времени. В блок «показатели основной составляющей» необходимо отнести данные о пассажирских и грузовых перевозках всеми видами транспортных средств, количестве предприятий, оказывающих транспортные и складские услуги, плотности автомобильных

дорог и железнодорожных путей сообщения и др. Обеспечивающая составляющая должна быть представлена показателями, характеризующими финансовую и информационную сферы региона. К ним могут быть отнесены объем иностранных инвестиций, количество компаний, использующих в своей деятельности ИКТ, а также оказывающих консалтинговые и финансовые услуги.

Кроме этого, в методике проводится проверка на соответствие распределений значений в выборке для каждого параметра нормальному закону распределения с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. Исходя из того, что данные представлены в разных шкалах измерения, необходимо провести процедуру их стандартизации. Для этого предлагается воспользоваться формулой (3).

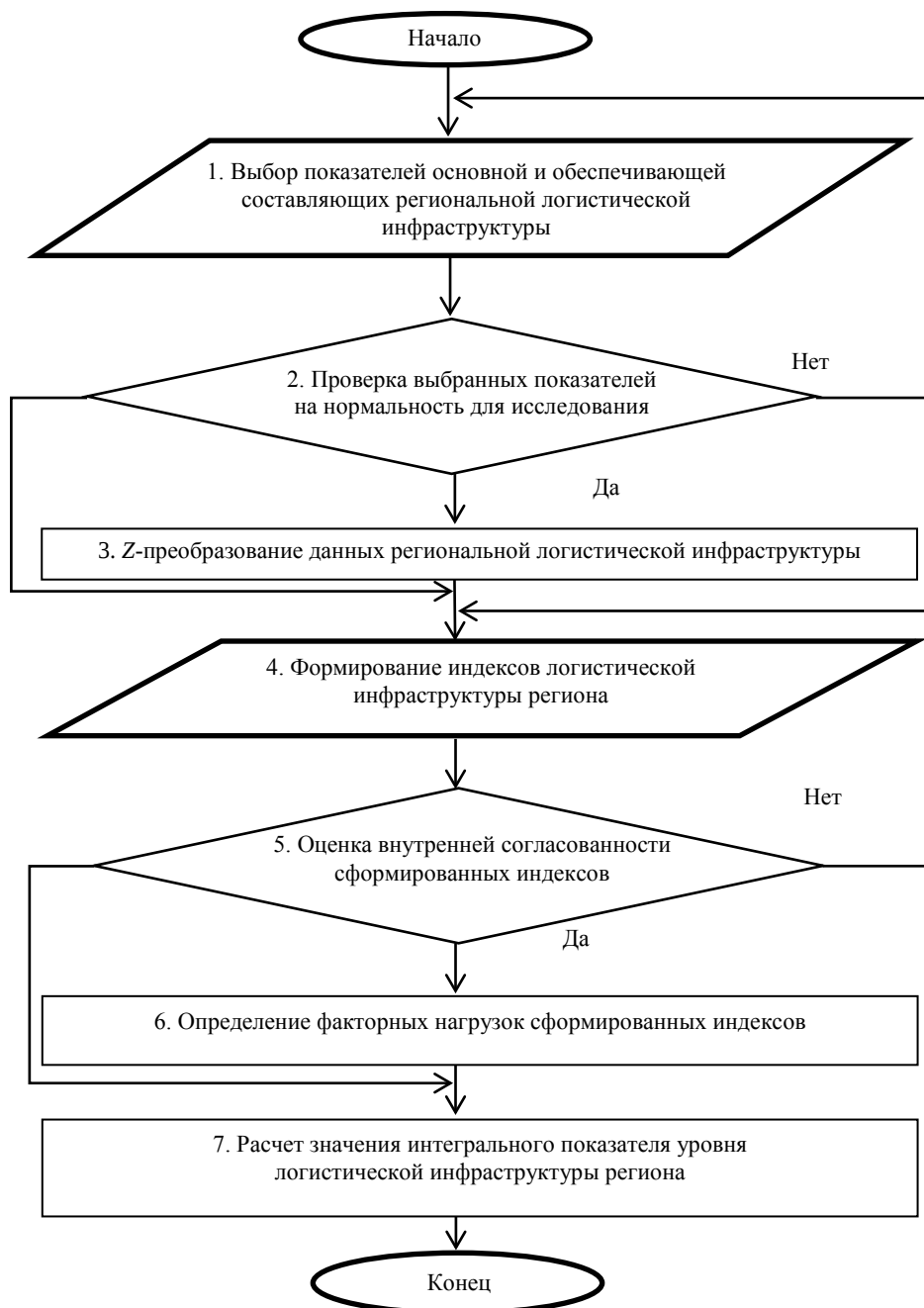


Рис. 1. Алгоритм оценки уровня логистической инфраструктуры региона

Fig. 1. Algorithm for assessing the level of the logistics infrastructure of the region

Важным этапом является преобразование группировки показателей в индексы. Индексы формируются по видам транспорта, складской деятельности, объектам финансовой и информационной деятельности и т. д. Например, индекс автомобильного транспорта рассчитывается как сумма стандартизированных значений по годам показателей пассажирских и грузовых автоперевозок, плотности автомобильных дорог и т. д. После формирования индексов необходимо провести оценку их внутренней согласованности с помощью коэффициента α -Кронбаха.

С целью определения факторной нагрузки для каждого индекса необходимо провести факторный анализ. В качестве метода исследования целесообразно применить метод анализа главных компонент. Метод вращения – вари-макс с нормализацией Кайзера.

Расчет интегрального показателя для регионов проводится по формуле

$$I = \sum_{i=1}^N k_i F_i, \quad (9)$$

где k_i – значимость соответствующего индекса; F_i – наибольшее значение факторной нагрузки соответствующего индекса.

Отличие данной методики от рассмотренных выше заключается в учете всех составляющих логистической инфраструктуры и проверке на адекватность исходных данных.

ВЫВОД

Таким образом, исследуя различные подходы и методики оценки логистической инфраструктуры, которые могут использоваться для разработки планов ее развития и привлечения инвестиций в определенные объекты инфраструктуры, целесообразно учитывать внешние и внутренние условия и факторы функционирования таких объектов, необходимость развития отдельных составляющих логистической инфраструктуры для исследуемого региона и соответствие приоритетным направлениям развития логистической системы страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Connecting to Compete 2018: Trade Logistics in the Global Economy [Electronic Resource] / J. F. Arvis [et al.] // Open Knowledge Repository. 2018. Mode of access: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29971>. Date of access: 04.05.2022.
2. The Global Competitiveness Report 2018 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf>. Date of access: 04.05.2022.
3. The Travel & Tourism Competitiveness Report 2019 [Electronic Resource]. Mode of access: https://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf. Date of access: 04.05.2022.
4. World Competitiveness Yearbook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.imd.org/centers/world-competitiveness-center/rankings/world-competitiveness>. Date of access: 04.05.2022.
5. The Global Enabling Trade Report 2016 [Electronic Resource]. Mode of access: https://www3.weforum.org/docs/WEF_GETR_2016_report.pdf. Date of access: 04.05.2022.
6. Об утверждении Методики расчета показателей (индикаторов) государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы», транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года и федеральных проектов, входящих в его состав [Электронный ресурс]: приказ Мин-ва транспорта РФ, 30.04.2019, № 129. Режим доступа: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf>. Дата доступа: 04.05.2022.
7. Кудрявцев, А. М. Методика комплексной оценки эффективности функционирования транспортной инфраструктуры региона / А. М. Кудрявцев, Л. Н. Руднева // Российское предпринимательство. 2014. № 8 (254). С. 109–121.
8. Катаева, Ю. В. Интегральная оценка уровня развития транспортной инфраструктуры региона / Ю. В. Катаева // Вестник Пермского университета. Экономика. 2013. Вып. 4 (19). С. 66–73.
9. Рахмангулов, А. Н. Оценка социально-экономического потенциала региона для размещения объектов логистической инфраструктуры / А. Н. Рахмангулов, О. А. Копылова // Экономика региона. 2014. № 2. С. 254–263.
10. Infrastructure and Logistics Divide: Regional Comparisons between North Eastern & Southern Italy / F. Carlucci [et al.] // Technological and Economic Development of Economy. 2017. Vol. 23, No 2. P. 243–269. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1070768>.
11. Evolutionary Game Analysis on Last Mile Delivery Resource Integration – Exploring the Behavioral Strategies between Logistics Service Providers, Property Service Companies and Customers / L. Zhou [et al.] // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 12240. <https://doi.org/10.3390/su132112240>.
12. The Evaluation of the Efficiency of Transport and Logistics Infrastructure of Railway Transport / K. S. Mukhtarova [et al.] // Pomorstvo. 2018, Vol. 32, No 1. P. 88–101. <https://doi.org/10.31217/p.32.1.3>

Поступила 30.06.2022

Подписана в печать 19.07.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Arvis J. F., Ojala L., Wiederer C., Shepherd B., Raj A., Dairabayeva K., Kiiski T. (2018) Connecting to Compete 2018: Trade Logistics in the Global Economy. *Open Knowledge Repository*. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29971> (accessed 4 May 2022).
2. *The Global Competitiveness Report 2018*. Available at: <https://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf> (accessed 4 May 2022).
3. *The Travel & Tourism Competitiveness Report 2019*. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf (accessed 4 May 2022).
4. *World Competitiveness Yearbook*. Available at: <https://www.imd.org/centers/world-competitiveness-center/rankings/world-competitiveness/> (accessed 4 May 2022).
5. *The Global Enabling Trade Report 2016*. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_GETR_2016_report.pdf (accessed 4 May 2022).
6. On Approval of the Methodology for Calculating Indicators of the State Program of the Russian Federation “Development of the Transport System”, the Transport Part of the Comprehensive Modernization Plan and Expansion of the Main Infrastructure for the Period up to 2024 and Federal Projects Included in its Composition: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation, dated 30.04.2019, No 129. Available at: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf> (accessed 4 May 2022) (in Russian).
7. Kudryavtsev A. M., Rudneva L. N. (2014) Methodology for a Comprehensive Assessment of the Functioning Efficiency of the Regional Transport Infrastructure. *Rossiiskoe Predprinimatelstvo* [Russian Entrepreneurship], (8), 109–121 (in Russian).
8. Kataeva Yu. V. (2013) Integral Assessment of the Level of the Regional Transport Infrastructure Development. *Vestnik Permskogo Universiteta. Ekonomika = Perm University Herald. Economy*, (4), 66–73 (in Russian).
9. Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. (2014) Assessment of the Socio-Economic Potential of the Region for the Placement of Logistics Infrastructure Facilities. *Ekonomika Regiona = Economy of the Regions*, (2), 254–263 (in Russian).
10. Carlucci F., Cirà A., Forte E., Siviero L. (2017) Infrastructure and Logistics Divide: Regional Comparisons between North Eastern & Southern Italy. *Technological and Economic Development of Economy*, 23 (2), 243–269. <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1070768>.
11. Zhou L., Chen Y., Jing Y., Jiang Y. (2021) Evolutionary Game Analysis on Last Mile Delivery Resource Integration – Exploring the Behavioral Strategies between Logistics Service Providers, Property Service Companies and Customers. *Sustainability*, 13, 12240. <https://doi.org/10.3390/su132112240>.
12. Mukhtarova K. S., Ospanov S. S., Antoni A., Sharapiyeva M. D. (2018) The Evaluation of the Efficiency of Transport and Logistics Infrastructure of Railway Transport. *Pomorstvo*, 32 (1), 88–101. <https://doi.org/10.31217/p.32.1.3>.

Received: 30.06.2022

Accepted: 19.07.2022

Published online: 31.01.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-79-86>

УДК 338.45+330.34

Организационно-экономические механизмы модернизации реального сектора: на примере легкой промышленности

Докт. экон. наук, проф. С. Ю. Солодовников¹⁾, канд. экон. наук, доц. Т. В. Сергиевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Цель статьи – разработка организационно-экономических механизмов модернизации реального сектора на примере легкой промышленности. Достижению поставленной цели способствовало решение следующих задач: исследование предпосылок модернизации отечественной промышленности; выявление рисков цифрового развития предприятия; выработка конкретных механизмов модернизации предприятий легкой промышленности Республики Беларусь в условиях цифровизации. Материалом для написания статьи послужили научные работы отечественных и зарубежных ученых последних лет, результаты научно-исследовательских работ, выполняемых авторами. Применялись системный и институциональный подходы, анализ и синтез. Разработаны организационно-экономические механизмы модернизации легкой промышленности, реализации которых будут способствовать: применение комплексного подхода к трансформации бизнес-модели в условиях цифровизации; разработка стратегии цифрового развития предприятия с учетом реальной и потенциальной степени цифровизации всех звеньев цепочки создания стоимости; формирование «цифрового ядра» фокальной компании, вокруг которого выстраивается сеть гибких децентрализованных производственных и сервисных подразделений; персонификация функций цифрового развития и обеспечения информационной безопасности предприятия; переход к омниканальной сбытовой стратегии; построение устойчивых интегрированных каналов коммуникации с потребителем в цифровой среде; производство контента как инструмент создания новых источников потребительной стоимости; переход к гибридным моделям, объединяющим виртуальные и реальные процессы создания стоимости; проработка механизмов использования возможностей накопления и коммерциализации информационно-цифрового капитала; подготовка специалистов инженерно-экономического профиля в области цифровых технологий на промышленном предприятии.

Ключевые слова: модернизация экономики, легкая промышленность, цифровизация, промышленное предприятие, национальная экономика, цифровая бизнес-модель, цифровая экономика, риски

Для цитирования: Солодовников, С. Ю. Организационно-экономические механизмы модернизации реального сектора: на примере легкой промышленности / С. Ю. Солодовников, Т. В. Сергиевич // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-79-86>

Organizational and Economic Mechanisms for Modernization of Real Sector: on the Example of Light Industry

S. Y. Solodovnikov¹⁾, T. V. Serhiyevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of the paper is to develop organizational and economic mechanisms for the modernization of the real sector on the example of light industry. The achievement of the set goal was facilitated by the solution of the following tasks: the study of the prerequisites for the modernization of domestic industry; identification of risks of digital development of the enterprise; development of specific mechanisms for the modernization of light industry enterprises of the Republic of Belarus in the context of digitalization. The material writing the paper was the scientific works of domestic and foreign scientists of recent years, the results of research work carried out by the authors. Systematic and institutional approaches,

Адрес для переписки

Солодовников Сергей Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-93-54
solodovnikov@bntu.by

Address for correspondence

Solodovnikov Sergey Y.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-93-54
solodovnikov@bntu.by

analysis and synthesis have been applied in the research. Organizational and economic mechanisms for the modernization of light industry have been developed, the implementation of which will be facilitated by: application of an integrated approach to the transformation of a business model in the context of digitalization; development of an enterprise digital development strategy, taking into account the actual and potential degree of digitalization of all links in the value chain; formation of a “digital core” of a focal company, around which a network of flexible decentralized production and service units is being built; personification of the functions of digital development and information security of the enterprise; transition to an omnichannel marketing strategy; building sustainable integrated channels of communication with the consumer in the digital environment; content production as a tool for creating new sources of consumer value; transition to hybrid models that combine virtual and real value creation processes; elaboration of mechanisms for using the opportunities for accumulation and commercialization of information and digital capital; training of engineering and economic specialists in the field of digital technologies at an industrial enterprise.

Keywords: modernization of the economy, light industry, digitalization, industrial enterprise, national economy, digital business model, digital economy, risks

For citation: Solodovnikov S. Y., Serhiyevich T. V. (2023) Organizational and Economic Mechanisms for Modernization of Real Sector: on the Example of Light Industry. *Science and Technique*. 22 (1), 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-79-86> (in Russian)

Введение

В международных экономических отношениях сегодня наблюдается, с одной стороны, усиление глобализации, сопровождаемое развитием международной интеграции, а с другой – интенсификация процессов регионализации. Названные противоречивые тенденции способствуют росту конъюнктурной нестабильности, порождаемой как ускорением научно-технического развития, так и ростом экологических, социальных, военно-политических и иных угроз и рисков. В этих условиях для Республики Беларусь жизненно важно найти новые ресурсы технико-технологической модернизации реального сектора, входить в существующие и создавать новые международные технологические сети, которые обеспечат нашей стране дополнительные возможности для получения новейших технологий и доступ на зарубежные товарные рынки. «Решоринг части производства и ускорение существующих тенденций, возникших вследствие пандемии COVID-19, вероятно, еще больше изменит топологию сетей ГЦСС (*глобальных цепочек создания стоимости*). – С. С., Т. С.), – пишут китайские исследователи. – Явное направление этих изменений – сделать сложные торговые сети ГЦСС более региональными» [1, с. 561]. Локализация цепочек создания стоимости на региональном уровне снижает издержки организации производства в кризисный и издержки восстановления производства в посткризисный периоды, а в рамках интеграционных объединений дополнительно позволяет снизить

риски оппортунистического поведения партнеров, определяемого не только национальными экономическими интересами, но и внешнеполитической конъюнктурой. Кроме того, такая локализация позволяет реализовать потенциал сравнительных конкурентных преимуществ отдельных производственных этапов и использовать участие в цепочках создания стоимости как инструмент получения доступа национальных производителей к экспортным рынкам.

Беспрецедентное внешнее экономическое давление на нашу страну актуализирует проблему разработки механизмов модернизации отечественной промышленности как станового хребта национальной экономики. При этом, как подчеркивает Ю. В. Мелешко, «в условиях технологической неопределенности смещение фокуса с развития конкретных технологий на новую индустриализацию... должно стать основой развития промышленного производства. <...> Увлечение новейшими технологиями, концентрирующими интеллектуальные, трудовые и финансовые ресурсы, приводит к отставанию в традиционных укладах, которые зачастую дают больший экономический эффект. Новая индустриализация же направлена на повышение эффективности всех отраслей промышленности за счет использования самых разнообразных новых технологий, в первую очередь цифровых» [2, с. 359]. По справедливому замечанию российских ученых, на перспективы цифровизации экономики влияют такие факторы, как «резкий рост экономической, политической, военной, межстрановой, межрегиональной конкуренции на глобальном про-

странстве, вхождение стран в эпоху неоиндустриализации, обострение конфликтов в борьбе за ресурсы и рынки сбыта» [3, с. 4]. В то же время цифровизация открывает новые возможности модернизации отраслей экономики, относимых к традиционным укладам. При реализации структурной политики государства следует учитывать, что если она направлена на научно обоснованное опережающее развитие услуг промышленного характера, то модернизация реального сектора экономики будет проходить быстрее, последовательнее и потребует относительно меньших издержек, чем в случае, когда структурная политика ориентируется на достижение мифологизированной (т. е. научно не обоснованной) цели достижения шестого, седьмого или еще какого-то более высокого технологического уклада в стремлении идти по пути экономически развитых стран. С учетом этих замечаний перейдем к разработке организационно-экономических механизмов модернизации промышленности в Республике Беларусь в условиях цифровизации, сконцентрировав внимание на такой традиционной отрасли экономики, как легкая промышленность.

Основная часть

Проведенные авторами исследования показали, что новые источники потребительной стоимости в промышленности возникают под влиянием: цифровизации в результате увеличения скорости разработки, производства и распределения товаров; кастомизации производства; трансформации цепочек создания стоимости и динамической организации производства; использования репутационного капитала страны базирования; привлечения в отрасль высококвалифицированных кадров; перераспределения точек капитализации между отдельными процессами создания стоимости; перехода к гибридным моделям создания стоимости, объединяющим виртуальные и реальные процессы; действия принципа домино в цифровизации предприятия и отрасли. Для того чтобы использовать возможности цифровой экономики, на уровне предприятия необходимо применять комплексный подход к трансформации бизнес-модели в условиях цифровизации, затрагивающей все ее внутренние производственные и

бизнес-процессы (включая цифровизацию системообразующих элементов бизнес-модели), а также взаимодействие с другими участниками цепочек создания стоимости, потребителями, государством. Как отмечается М. А. Ларионовой и В. Н. Бабешко, «предприятия, имеющие базовый уровень цифровизации, смогут быстрее реагировать на дальнейшее развитие технологий искусственного интеллекта и раньше других внедрять их самые передовые разработки в свою работу и продукт» [4, с. 91]. Эффективная трансформация бизнес-модели в условиях цифровизации требует разработки стратегии цифрового развития предприятия с учетом реальной и потенциальной степени цифровизации всех звеньев цепочки создания стоимости. Цифровизация лишь отдельных элементов цепочки создания стоимости или бизнес-модели снижает эффективность используемых цифровых инструментов. При этом следует принимать во внимание складывающиеся сегодня тенденции в цепочках создания стоимости в легкой промышленности, а именно такие, как: рост неустойчивости и динамичности; изменение последовательности звеньев и трансформация от линейной к сетевой структуре; локализация в национальных и региональных границах; просьюмеризация; расширение многообразия внутри- и межотраслевых связей; изменения в распределении доходности и власти между отдельными звеньями в пользу информационно-аналитических, логистических структур и электронных торговых площадок; снижение влияния стоимости трудовых ресурсов как фактора фрагментации цепочки создания стоимости; увеличение прозрачности; снижение потребности в аутсорсинге и упрощение цепочек создания стоимости под влиянием роботизации [5, с. 127]. Противоречивость некоторых тенденций свидетельствует об активной фазе структурной трансформации цепочек создания стоимости в легкой промышленности.

Стратегия цифрового развития предприятия должна учитывать как традиционные, так и новые, обусловленные цифровизацией риски (риски цифровой уязвимости, роста неоднородности технологической структуры, инвестиций в неправильно выбранные технологии, дефицита или недостоверности информации, возникновения «колодцев компетенций», низкого

уровня компетенций базовых исполнителей – разработчиков кода из цепочки аутсорсеров и др.). Следует учитывать, что некоторые традиционные риски приобретают новое качество, например: изменение структуры нарастающего кадрового дефицита в результате цифровизации трансформирует характер рисков, связанных с трудовыми ресурсами; в результате расширения применения технологий анализа больших данных в прогнозировании модных тенденций меняется характер действия риска недоучета фактора моды и т. д.

Трансформацию бизнес-модели предприятия легкой промышленности следует начать с формирования «цифрового ядра» фокальной компании, вокруг которого будет выстраиваться сеть гибких децентрализованных производственных и сервисных подразделений. «Ядро бизнес-модели определяется как совокупность ресурсов, которые посредством транзакций создают ценность для компании и ее клиентов» [6, с. 383]. Под транзакциями здесь имеется в виду определенная совокупность производственных и бизнес-процессов, в результате которых создается потребительская стоимость. В отличие от классических бизнес-моделей подобная сеть позволяет амортизировать влияние локальных рисков на всю систему, она более открыта и адаптивна. Относительная независимость отдельных звеньев, взаимодействие которых с фокальной компанией может осуществляться в форме инсорсинга, позволяет находить дополнительные источники дохода вне фокальной компании, выстраивать собственную стратегию по поиску и удержанию кадров с необходимыми компетенциями, самостоятельно привлекать инвестиции.

Трансформация бизнес-модели, обусловленная цифровизацией ее внешней и/или внутренней среды, неизбежно влечет за собой возникновение потребности в новых навыках и компетенциях. Проблема поиска и удержания кадров с необходимыми компетенциями касается как представителей рабочих специальностей, где предприятию приходится конкурировать на рынке труда, который характеризуется сокращающимся объемом предложения, так и инженеров, программистов, разработчиков, на рынках труда которых объем спроса растет опережающими объемом предложения темпами.

Персонализация функций по цифровому развитию и обеспечению информационной безопасности предприятия может быть достигнута за счет введения должности директора по цифровому развитию или информационным технологиям в зависимости от специфики деятельности предприятия и стратегии его цифрового развития. Лишь некоторые белорусские предприятия легкой промышленности уже имеют в составе топ-менеджмента директоров по информационным технологиям (например, ООО «Формэль», обувной холдинг «Марко» и некоторые другие). Процессы цифровизации предприятия легкой промышленности требуют и привлечения специалистов, отвечающих непосредственно за разработку и реализацию проектов по цифровизации производственных и бизнес-процессов предприятия (от внедрения интернета вещей и роботизированных систем в производственные и управленческие процессы до цифрового маркетинга и электронной коммерции). С этой целью в Белорусском национальном техническом университете уже сегодня начата подготовка специалистов инженерно-экономического профиля в области цифровых технологий на промышленном предприятии. Кроме этого, требования к работникам должны быть дополнены навыками применения информационных технологий в профессиональной деятельности, в том числе с учетом угроз информационной безопасности. Цифровизацию производственных и бизнес-процессов необходимо сопровождать дополнительным обучением персонала, что способствует не только наращиванию человеческого капитала предприятия и повышению за счет этого положительных эффектов цифровизации, но и преодолению инертности и низкой адаптивности персонала.

На уровне предприятий и отрасли следует осуществлять постоянное обновление механизмов выведения товаров на рынок, основанное на технологизации традиционной дистрибуции и ее дополнении цифровыми каналами продвижения и сбыта, что обусловлено изменением поведения и ожиданий потребителя в условиях цифровизации. Растущий потенциал цифровизации общества может быть использован при переходе к омниканальной сбытовой стратегии предприятий легкой промышленности, осно-

ванной на комбинации традиционных и цифровых инструментов продвижения и дистрибуции с целью увеличения скорости вывода товара на рынок и роста масштабов охвата потребителей. Как отмечают итальянские исследователи, «на новые бизнес-модели, главным образом основанные на взаимодействии с клиентами, влияет, в первую очередь, изменение каналов сбыта, ориентированное на многоканальную стратегию. На пути к потребителю цифровые инструменты улучшают различные аспекты клиентского опыта, в частности информативность, развлечения и социальное присутствие» [7, с. 653]. В условиях развития интернета, логистики и цифрового маркетинга сдвигаются границы товарных рынков, что должно использоваться предприятиями легкой промышленности для расширения своего присутствия. Данные изменения касаются как каналов дистрибуции, где следует использовать растущий потенциал электронной коммерции с помощью собственных или внешних торговых площадок, так и технологий продвижения, охватывающих использование возможностей социальных сетей. В условиях цифровизации возрастает значение такого фактора эффективности бизнес-модели, как скорость коммерциализации производимой продукции или услуг, на рост которой должно быть направлено обновление механизмов вывода товаров на рынок.

Для предприятия становится важным выстраивать устойчивые интегрированные каналы коммуникации с потребителем в цифровой среде (сайты, социальные сети и др.). «Поскольку информация о продукции становится такой же важной, как и сама продукция, почти каждая компания в настоящее время занимается созданием и предоставлением “контента”» [8, с. 17]. За счет производства контента (персонализированной, релевантной и доступной для потребителя информации), который направлен на наделение производимых товаров новыми знаковыми свойствами, могут создаваться новые источники потребительной стоимости. Производство контента благодаря цифровым инструментам позволяет дополнить производство продукта (товара) оказанием цифровой услуги – предоставлением информации, развлекательной услуги, социального присутствия. Предприятия легкой промышленности могут

выступать в качестве активных производителей социального отношения (формирование потребностей и механизмов признания и общественного воспроизводства знаковой системы, конструирование связи производимых товаров с общепринятой знаковой системой, управление механизмами доступа различных групп населения к знаковым благам) и основными выгодополучателями. Через знаковое потребление выражаются социальная принадлежность и социальная тактика индивидов, например приверженность модным тенденциям, поддержка эколого ориентированных трендов, патриотическая принадлежность, социальная ответственность и т. д. Кроме того, цифровые каналы коммуникации с потребителями могут использоваться для создания персонализированных в соответствии с историей предпочтений потребителя предложений. На первоначальных этапах цифровизация коммуникации с потребителем не требует значительных инвестиций, поэтому эти инструменты могут успешно применяться также малым и средним бизнесом.

Предприятиям легкой промышленности следует рассмотреть возможности перехода к гибридным моделям, объединяющим виртуальные и реальные процессы создания стоимости. «Для того чтобы виртуализация производства происходила не в ущерб конечному результату и с максимальной экономической отдачей, – отмечают по этому поводу Н. Л. Корнилова, С. В. Салкуцан, А. Е. Горелова и Д. А. Васильев, – компаниям необходимы технологии, объединяющие и автоматизирующие все разрозненные этапы жизненного цикла изделия, создающие интегрированную среду коллективной работы, где каждый участник производственной цепочки имеет в реальном времени доступ к нужной ему информации по изделию» [9, с. 40]. Новые источники создания потребительной стоимости бизнес-моделей в легкой промышленности основываются на сервисных стратегиях (выручка от подписки потребителей на краткосрочную аренду одежды с возможностью последующего выкупа, услуги стилиста по выбору одежды); производстве цифровых услуг; НИОКР в сфере создания умной одежды; разработке инновационных систем управления спросом, основанных на технологиях больших данных и искусственного интел-

лекта, для оказания внутренних и внешних услуг. Диверсификация продуктового портфеля расширяет не только источники формирования дохода, но и возможности привлечения инвестиций за счет цифровых проектов, инвестиционная конъюнктура для которых сегодня складывается более благоприятно.

Появление более компактных, мощных и дешевых датчиков, развитие сферы мобильных приложений открывают новые ниши на рынках легкой промышленности. «Усиление действия технологического фактора обуславливает распространение феномена техно-моды, который отражает тенденцию к демонстрации индивидами своей причастности к научно-техническому прогрессу посредством потребления технологических новинок, в том числе и в одежде» [10, с. 196]. Умный текстиль и умная одежда трансформируют, помимо сферы товаров военного назначения, главным образом потребительские рынки в области здоровья и спорта. Например, словенские исследователи А. Рудольф, А. Купар и З. Степанович полагают, что цифровизация швейной промышленности открывает новые «возможности кастомизации в производстве одежды с помощью оцифровки и виртуального прототипирования, в том числе для инвалидов и лиц с деформациями позвоночника, а также разработки умной одежды с цифровыми функциями и интеллектуальными устройствами» [11, с. 13]. Среди ограничителей развития рынка умного текстиля эксперты называют такие, как: «низкая общественная осведомленность; выпуск недостаточно стильных изделий; высокая стоимость для массовой аудитории; возможная угроза личной безопасности, связанная с использованием “умной” одеждой личных данных пользователя» [12, с. 63]. Производство умной одежды предполагает трансформацию модели дохода для предприятия за счет оказания дополнительных услуг (главным образом цифровых), связанных с ношением умной одежды. В связи с появлением рынка таких услуг исследователи экономики легкой промышленности и индустрии моды начинают высказывать сомнения, «останется ли разовая покупка одежды наиболее многообещающей моделью получения дохода. Если ценность для клиента создается в результате оказания услуги, компании могут,

например, предлагать продукты бесплатно в сочетании с соответствующей экосистемой услуг (например, советы по питанию или коучинг по фитнесу и образу жизни). Заказчик оплачивает услугу и получает предмет умной одежды... Таким образом, доход может генерироваться на протяжении всего жизненного цикла продукта и может быть расширен и скорректирован» [13, с. 7]. Бизнес-модель подобного типа О. Бер предлагает называть «Одежда как услуга (CaaS)» (от англ. Clothes-as-a-Service).

На мезоуровне в легкой промышленности следует проработать механизмы использования возможностей накопления и коммерциализации информационно-цифрового капитала, потенциально приносящего цифровую ренту для заинтересованных сторон. Цифровизация создает технологические возможности создания ценности для клиента, основанные на сборе и аналитике данных, – персонализированные предложения, прогнозирование спроса и управление поведением потребителя, расширение продуктового портфеля за счет производства умной одежды и цифровых услуг, сопровождающих весь жизненный цикл изделия. Сбор и анализ больших данных позволяет на самых ранних этапах выявлять изменения потребительских предпочтений и открывать тем самым доступ к конкурентным преимуществам в скорости реагирования на изменения спроса. Исследователи, проводившие эмпирический сравнительный анализ традиционных инструментов прогнозирования модных тенденций и инновационных инструментов анализа больших данных, приходят к выводу: несмотря на то что «результаты исследования свидетельствуют о большом потенциале использования инструментов больших данных для прогнозов модных компаний и создания новых продуктов» [14, с. 8], поскольку многие из парных прогнозов демонстрируют высокую степень сходства, особенно в отношении рисунков и цветов, «традиционное прогнозирование модных тенденций не исчезнет в ближайшее время, и большие данные никогда не смогут полностью заменить дизайнеров, которые часто не только предсказывают, но и способствуют созданию оригинальных, совершенно новых модных тенденций» [14, с. 8]. В ближайшие десятилетия аналитические инструменты прогнозирования спроса хотя и не

заменяют творческий труд дизайнеров, но вполне могут служить средством повышения эффективности и корректировки торговых и маркетинговых стратегий коммерческих организаций.

ВЫВОД

В статье на примере легкой промышленности разработаны организационно-экономические механизмы модернизации реального сектора, реализации которых будут способствовать: применение комплексного подхода к трансформации бизнес-модели в условиях цифровизации; разработка стратегии цифрового развития предприятия с учетом реальной и потенциальной степени цифровизации всех звеньев цепочки создания стоимости, учитывающей как традиционные, так и новые, обусловленные цифровизацией, риски (риски цифровой уязвимости, роста неоднородности технологической структуры, инвестиций в неправильно выбранные технологии, дефицита или недостоверности информации, возникновения «колодцев компетенций», низкого уровня компетенций базовых исполнителей – разработчиков кода из цепочки аутсорсеров); формирование «цифрового ядра» фокальной компании, вокруг которого выстраивается сеть гибких децентрализованных производственных и сервисных подразделений; персонификация функций цифрового развития и обеспечения информационной безопасности предприятия; переход к омниканальной сбытовой стратегии, основанной на комбинации традиционных и цифровых инструментов продвижения и дистрибуции; построение устойчивых интегрированных каналов коммуникации с потребителем в цифровой среде; производство контента как инструмент создания новых источников потребительской стоимости; переход к гибридным моделям, объединяющим виртуальные и реальные процессы создания стоимости (сервисные стратегии; производство цифровых услуг; НИОКР в сфере создания умной одежды; разработка инновационных систем управления спросом, основанных на технологиях больших данных и искусственного интеллекта, для оказания внутренних и внешних услуг); проработка механизмов использования возможностей накоп-

ления и коммерциализации информационно-цифрового капитала, потенциально приносящего цифровую ренту для заинтересованных сторон; подготовка специалистов инженерно-экономического профиля в области цифровых технологий на промышленном предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Are Global Value Chains Truly Global? / Hao Xiao, Bo Meng, Jiabai Ye, Shantong Li // *Economic Systems Research*. 2020. Vol. 32, Iss. 4. P. 540–564. <https://doi.org/10.1080/09535314.2020.1783643>.
2. Мелешко, Ю. В. Новая индустриализация и тенденции модернизации белорусской промышленности / Ю. В. Мелешко // *Наука и техника*. 2021. Т. 20. № 4. С. 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-357-364>.
3. Лепеш, Г. В. Концептуальные основы цифровой индустриализации (на примере стран с различными технологическими укладами) / Г. В. Лепеш, О. Д. Угольников, Л. П. Шарафутдинова // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2021. № 2 (56). С. 3–14.
4. Ларионова, М. А. Перспективы применения искусственного интеллекта в легкой промышленности / М. А. Ларионова, В. Н. Бабешко // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 7 (109). С. 89–92.
5. Сергиевич, Т. В. Предпосылки и тенденции трансформации цепочек создания стоимости в условиях роботизации: на примере легкой промышленности / Т. В. Сергиевич // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2021. № 3 (84). С. 120–128. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2021.3.15>.
6. DaSilva, C. M. Business Model: What it is and What it is not / C. M. DaSilva, P. Trkman // *Long Range Planning*. 2014. Vol. 47, No 6. P. 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2013.08.004>.
7. Digital Transformation and Customer Value Creation in Made in Italy SMEs: A Dynamic Capability Perspective / M. Matarazzo [et al.] // *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 123. P. 642–656. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.10.033>.
8. Berman, S. J. Digital Transformation: Opportunities to Create New Business Models / S. J. Berman // *Strategy & Leadership*. 2012. Vol. 40, No 2. P. 16–24. <https://doi.org/10.1108/10878571211209314>.
9. Основные подходы к созданию цифровых фабрик в индустрии моды / Н. Л. Корнилова [и др.] // *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)*. 2018. № 1-1. С. 39–45.
10. Сергиевич, Т. В. Технологизация в современной экономике: на примере производства товаров интенсивного обновления / Т. В. Сергиевич // *Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. Вып. 9. Минск: БНТУ*, 2019. С. 192–199. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2019-9-192-199>.
11. Rudolf, A. Supporting Digitalization in Garment Engineering Through Virtual Prototyping / A. Rudolf, A. Cupar,

- Z. Stjepanović // *TEXTEH 9 International Conference Proceedings*. October 24–25, 2019, Bucharest. 2019. P. 10–14. <https://doi.org/10.35530/tt.2019.02>.
12. Седых, И. А. Индустрия моды. 2019 год / И. А. Седых. М.: НИУ «Высшая школа экономики», Центр развития, 2019. 65 с.
 13. Behr, O. Fashion 4.0 – Digital Innovation in the Fashion Industry / O. Behr // *Journal of Technology and Innovation Management*. 2018. Vol. 2, No 1. P. 1–9.
 14. DuBreuil, M. Traditional vs. Big-Data Fashion Trend Forecasting: an Examination Using WGSN and EDITED / M. DuBreuil, S. Lu // *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*. 2020. Vol. 13, No 2. P. 68–77. <https://doi.org/10.1080/17543266.2020.1732482>.

Поступила 30.06.2022

Подписана в печать 01.09.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Hao Xiao, Bo Meng, Jiabai Ye, Shantong Li (2020) Are Global Value Chains Truly Global? *Economic Systems Research*, 32 (4), 540–564. <https://doi.org/10.1080/09535314.2020.1783643>.
2. Mialeshka Yu. V. (2021) New Industrialization and Trends in Modernization of Belarusian Industry. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (4), 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-357-364> (in Russian).
3. Lepesh G. V., Ugolnikova O. D., Sharafutdinova L. R. (2021) Conceptual Foundations of Digital Industrialization (on the Example of Countries with Different Technological Paradigms). *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa* [Technical and Technological Service Problems], 2 (56), 3–14 (in Russian).
4. Larionova M. A., Babeshko V. N. (2021) Prospects for the Use of Artificial Intelligence in Light Industry. *Mezhdunarodny Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal = International Research Journal*, (7), 89–92 (in Russian).
5. Sergievich T. V. (2021) Background and Trends of Transformation of Value Chains in the Context of Robotization: on the Example of Light Industry. *Vestnik Severo-Kavkazskogo Federal'nogo Universiteta = Newsletter of North-Caucasus Federal University*, (3), 120–128. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2021.3.15> (in Russian).
6. DaSilva C. M., Trkman P. (2014) Business Model: What it is and What it is not. *Long Range Planning*, 47 (6), 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2013.08.004>.
7. Matarazzo M., Penco L., Profumo G., Quaglia R. (2021) Digital Transformation and Customer Value Creation in Made in Italy SMEs: A Dynamic Capability Perspective. *Journal of Business Research*, 123, 642–656. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.10.033>.
8. Berman S. J. (2012) Digital Transformation: Opportunities to Create New Business Models. *Strategy & Leadership*, 40 (2), 16–24. <https://doi.org/10.1108/10878571211209314>.
9. Kornilova N. L., Salkutsan S. V., Gorelova A. E., Vasiliev D. A. (2018) Basic Approaches to Creating Digital Factories in the Fashion Industry. *Fizika Voloknistykh Materialov: Struktura, Svoystva, Naukoemkie Tekhnologii i Materialy (SMARTEX)* [Physics of Fibrous Materials: Structure, Properties, High Technologies and Materials. (SMARTEX)], 1-1, 39–45 (in Russian).
10. Sergievich T. V. (2019) Technologization in Modern Economics: on the Example of the Production of Intensively Renewable Goods. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnya: Sb. Nauch. St. = Economic Science Today: Collection of Scientific Papers*. Iss. 9. Minsk, BNTU, 192–199. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2019-9-192-199>.
11. Rudolf A., Cupar A., Stjepanović Z. (2019) Supporting Digitalization in Garment Engineering Through Virtual Prototyping. *TEXTEH 9 International Conference Proceedings*. October 24–25, 2019, Bucharest, 10–14. <https://doi.org/10.35530/TT.2019.02>.
12. Sedykh I. A. (2019) Fashion Industry. 2019. Moscow, National Research University “Higher School of Economy”, Development Center. 65 (in Russian).
13. Behr O. (2018) Fashion 4.0 – Digital Innovation in the Fashion Industry. *Journal of Technology and Innovation Management*, 2 (1), 1–9.
14. DuBreuil M., Lu S. (2020) Traditional vs. Big-Data Fashion Trend Forecasting: an Examination Using WGSN and EDITED. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 13 (2), 68–77. <https://doi.org/10.1080/17543266.2020.1732482>.

Received: 30.06.2022

Accepted: 01.09.2022

Published online: 31.01.2023