

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

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

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет

Vol. 20 / No 4 / 2021

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

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

CONTENTS

Машиностроение и машиноведение

Mechanical Engineering and Engineering Science

Королёв А. Ю., Алексеев Ю. Г., Нисс В. С. Паршута А. Э.	
Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах	279
Быков К. Ю., Качанов И. В., Шталаов И. М.	
Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов	287
Селивончик Н. М., Нестеренко Н. Л.	
Основы расчета противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клещевого механизмов	296
Маслиев В. Г., Фомин А. В., Ловская А. А., Маслиев А. О., Горбунов Н. И., Дущенко В. В.	
Прочность гибкой оболочки пневматической рессоры	302

Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E.	
Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes	279
Bykov K. Y., Kachanov I. V., Shatalov I. M.	
Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks	287
Selivonchik N. M., Nesterenko N. L.	
Basics of Calculating Anti-Theft Crane Device from Eccentric and Tick-Borne Mechanisms	296
Masliev V. G., Fomin A. V., Lovskaya A. A., Masliev A. O., Gorbunov N. I., Dushenko V. V.	
Strength of Flexible Shell of Pneumatic Springs	302

Юркевич А. В., Терешин А. В., Солдаткин В. А. Экспериментальные характеристики механической бесступенчатой передачи с внутренними силовыми функциями	310
--	-----

Строительство

Молодин В. В., Ануфриева А. Е., Леонович С. Н. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежесутоложенным бетоном	320
Батяновский Э. И., Бондарович А. И., Калиновская Н. Н., Рябчиков П. В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона	329

Вычислительная техника и управление

Лобатый А. А., Бумай А. Ю., Прохорович С. С. Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата	338
Лешок А. В., Попова Ю. Б. Использование искусственных нейронных сетей для определения износа композиционного фрикционного материала	345

Экономика промышленности

Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Шевелева Н. Е. Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры ...	352
Мелешко Ю. В. Новая индустриализация и тенденции модернизации белорусской промышленности ...	357

Yurkevich A. V., Tereshin A. V., Soldatkin V. A. Experimental Characteristics of Mechanical Continuously Variable Transmission with Internal Force Functions	310
--	-----

Civil and Industrial Engineering

Molodin V. V., Anufrieva A. E., Leonovich S. N. Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete	320
Batyanovskiy E. I., Bondarovich A. I., Kalinovskaya N. N., Ryabchikov P. V. Self-Compacting Concrete and Concreting Technology for Foundation Block Using 9000 Cubic Meters of Concrete	329

Computer Engineering and Management

Lobaty A. A., Bumai A. Y., Prohorovith S. S. Analytical Synthesis of Control Acceleration of Unmanned Aerial Vehicle	338
Liashok A. V., Popova Yu. B. Using Artificial Neural Networks to Determine Wear of Composite Friction Material	345

Economy in Industry

Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Sheveleva N. E. Algorithm for Solving Problem of Designing Regional Logistics Infrastructure ...	352
Mialeshka Yu. V. New Industrialization and Trends in Modernization of Belarusian Industry	357

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 «Гаоюань», 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),
- Опеляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков 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 17 292-65-14

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 30.07.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. . 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, 2021

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах

Кандидаты техн. наук, доценты А. Ю. Королёв¹⁾, Ю. Г. Алексеев¹⁾, В. С. Нисс¹⁾,
инж. А. Э. Паршут¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) получила широкое распространение в промышленности в качестве альтернативы традиционным химическим, электрохимическим и механическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов. Преимуществами ЭПО являются высокая интенсивность сглаживания микронеровностей, применение в качестве электролитов растворов солей низкой концентрации, возможность обработки изделий сложной формы. Основной недостаток метода – высокая энергоёмкость, поэтому его можно отнести к энергоёмкому производству. Для снижения энергоёмкости и повышения эффективности процесса ЭПО металлических материалов при сохранении его высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности предлагается принципиально новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимической обработки, так и ЭПО. Метод реализуется за счет совмещения в пределах одного импульса миллисекундной длительности двух чередующихся стадий: электрохимической и электролитно-плазменной. Высокая эффективность разработанного метода достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с большой плотностью тока и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. Уменьшение периода следования импульсов при снижении их длительности позволяет увеличить электрохимическую составляющую процесса и обеспечить более интенсивный съем металла, удалить значительные неровности поверхности. Увеличение периода следования импульсов при одновременном повышении их длительности позволяет увеличить электролитно-плазменную составляющую процесса и достигнуть низкой шероховатости при общем снижении энергоёмкости процесса. В результате выполнения работы исследовано влияние импульсных характеристик разработанного процесса, концентрации и температуры электролита на плотность тока и длительность электрохимической и электролитно-плазменной стадий, произведен сравнительный анализ эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного процесса на постоянном напряжении. Установлено, что скорость съема металла в данном импульсном процессе более чем в пять раз превышает скорость съема в процессе, основанном на применении постоянного напряжения, и составляет 40 мкм/мин. При этом энергетические затраты на реализацию импульсного процесса на 19 % меньше.

Ключевые слова: импульсы, электролитно-плазменная обработка, электрохимическая обработка, плотность тока, паргазовая оболочка, поверхность, съем металла

Для цитирования: Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королёв [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>

Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes

A. Yu. Korolyov¹⁾, Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. E. Parshuto¹⁾

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

Abstract. Electrolyte-plasma treatment (EPT) has become widespread in industry as an alternative to traditional chemical, electrochemical and mechanical methods of improving the surface quality of products made of metallic materials.

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

The advantages of EPT are a high intensity of smoothing of microroughnesses, the use of low-concentration salt solutions as electrolytes, and the ability to process items of complex shape. The main disadvantage of the method is its high energy consumption; therefore, the method can be classified as energy-intensive production. To reduce the energy intensity and increase the efficiency of the EPT process of metallic materials while maintaining high intensity, processing quality and environmental safety, we proposed a fundamentally new pulse method (pulsed EPT), which combines the advantages of both electrochemical processing and EPT. The method is realized by combining two alternating stages within one millisecond pulse: electrochemical and electrolyte-plasma. The high efficiency of the developed method is achieved due to the main intensive metal removal during the implementation of the electrochemical stage with a high current density and optimization of the duration of the electrolyte-plasma stage, which provides a high surface quality. A decrease in the repetition period of pulses with a decrease in their duration makes it possible to increase the electrochemical component of the process and to provide a more intensive metal removal, to remove significant surface irregularities. An increase in the pulse repetition period with a simultaneous increase in their duration permits to increase the electrolyte-plasma component of the process and achieve a low roughness with a general decrease in the energy intensity of the process. As a result of the work, the influence of the pulse characteristics of the developed process, the concentration and temperature of the electrolyte on the current density and the duration of the electrochemical and electrolyte-plasma stages has been investigated, a comparative analysis of the efficiency of using the pulsed EPT process instead of the traditional process at constant voltage has been carried out. It has been found that the metal removal rate in the developed pulse process is more than five times higher than the removal rate in the process based on the use of constant voltage, and is 40 $\mu\text{m}/\text{min}$, while the energy costs for the implementation of the pulse process is 19 % less.

Keywords: pulses, electrolytic-plasma treatment, electrochemical treatment, current density, vapor-gas shell, surface, metal removal

For citation: Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E. (2021) Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Science and Technique*. 20 (4), 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (in Russian)

Введение

Одним из прогрессивных методов повышения качества поверхности металлических изделий является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая широко используется для полирования, удаления заусенцев и очистки изделий медицинского назначения, декоративных изделий, деталей машин и приборов, а также для повышения физико-механических и химических свойств поверхности [1–3], подготовки поверхности к нанесению покрытий [4]. Другими направлениями применения технологии ЭПО являются: размерная обработка ответственных длинномерных изделий [5–7], полирование и очистка внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий [8], обработка поверхности с целью удаления инородных включений и снижения плотности дислокаций [9, 10].

ЭПО имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными методами механического, электрохимического и химического полирования:

- возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей до $Ra = 0,01$ мкм;
- высокую экологическую безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей с низкой концентрацией [11];

– повышенную коррозионную стойкость поверхности;

– возможность обработки деталей и изделий сложной формы [2, 11, 12].

Основным недостатком метода является высокая энергоемкость. Плотность мощности в процессе обработки может достигать 300 Вт/см², поэтому метод в его классическом виде можно отнести к энергоемкому производству [13]. Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса ЭПО металлических материалов при сохранении его высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности авторами предложен принципиально новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимической обработки, так и ЭПО. Метод реализуется за счет совмещения в пределах одного импульса миллисекундной длительности с амплитудой по напряжению более 90 В двух чередующихся стадий: электрохимической и электролитно-плазменной (рис. 1). На осциллограмме рис. 1а видно, что во время электрохимической стадии при увеличении напряжения происходит значительный рост силы тока, а при достижении определенного значения напряжения возникает электролитно-плазменная стадия, во время которой протекает высокочастотный ток намного меньшей амплитуды.

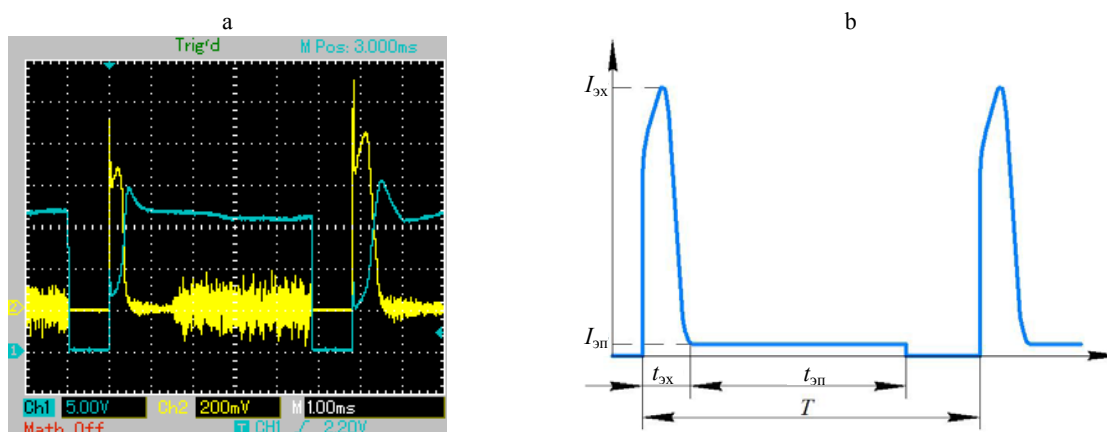


Рис. 1. Импульсные характеристики процесса:

a – осциллограммы напряжения (зеленая линия) и тока (желтая линия); b – диаграмма импульсов тока

Fig. 1. Pulse characteristics of process:

a – oscillograms of voltage (green line) and current (yellow line); b – diagram of current pulses

На рис. 1b представлена диаграмма изменения силы тока в пределах одного импульса с периодом следования T . Высокая эффективность достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии длительностью $t_{эx}$ с высоким значением силы тока $I_{эx}$ и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии $t_{эп}$, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. Уменьшение периода следования импульсов T при снижении их длительности позволяет увеличить электрохимическую составляющую процесса и обеспечить более интенсивный съем металла, удалить значительные неровности поверхности. Увеличение периода следования импульсов T при одновременном повышении их длительности дает возможность увеличить электролитно-плазменную составляющую процесса и достигнуть низ-

кой шероховатости при общем снижении энергоемкости процесса.

Цель исследований – изучение влияния характеристик импульсов разработанного процесса и концентрации электролита на плотность тока и длительность электрохимической и электролитно-плазменной стадий, сравнительный анализ эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного ЭПО на постоянном напряжении.

Материалы, оборудование и методы исследований

Для исследований использовали регулируемый от 0 до 300 В источник питания мощностью 12 кВт и мощный электронный ключ, позволяющий формировать импульсы тока заданной длительности амплитудой до 40 А (рис. 2) [14].

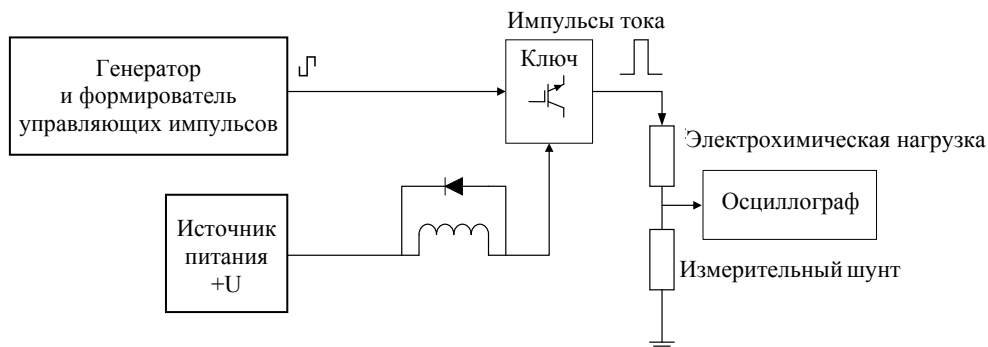


Рис. 2. Блок-схема источника питания для исследования импульсного процесса электролитно-плазменной обработки

Fig. 2. Block diagram of power supply for study of pulsed electrolyte-plasma treatment process

В качестве образцов использовали прутки из коррозионно-стойкой стали AISI 321 диаметром 1,8 мм. Обработку образцов выполняли в электрохимической ячейке с катодом из коррозионно-стойкой стали в форме трубы диаметром 100 мм. В качестве электролита использовали водный раствор сульфата аммония концентрацией до 40 %. Температура электролита составляла от 30 до 90 °С. Обработку проводили при следующих импульсных режимах: амплитуда напряжения 90–300 В, длительность импульсов 0,45–5,00 мс, коэффициент заполнения 33–83 %.

Контроль и запись формы импульсов тока осуществлялись запоминающим цифровым осциллографом С8-46/1 с помощью токового шунта с сопротивлением 0,05 Ом. Длительности стадий импульсного процесса устанавливали по осциллограммам. Начало электролитно-плазменной стадии определяли по возникновению высокочастотных импульсов малой амплитуды. Плотность тока находили как отношение силы тока к площади обрабатываемого образца. Внешний вид образцов до и после обработки представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образцов до и после обработки

Fig. 3. Appearance of samples before and after processing

Результаты исследований и их обсуждение

Период следования импульсов T включает длительности электрохимической $t_{\text{эх}}$ и электролитно-плазменной $t_{\text{эп}}$ стадий и паузы между импульсами. Длительность импульса t состоит из длительностей $t_{\text{эх}}$ и $t_{\text{эп}}$. Во время электрохимической стадии происходит основной сьем металла, поэтому ее длительность оказывает наиболее существенное влияние на производительность импульсного процесса.

Плотность тока в коротком высокоэнергетическом пике электрохимической стадии ($i_{\text{эх}}$) достигает сверхвысоких значений, на порядок превышающих соответствующие значения для существующих электрохимических процессов, за счет чего обеспечивается большой сьем металла. Так, с увеличением напряжения импульса с 90 до 240–300 В происходит пропорциональное повышение плотности тока со 100–130 до 330–400 А/см² (концентрация электролита 20 %, длительность импульса 5 мс). Причем температура электролита не оказывает существенного влияния на плотность тока (рис. 4).

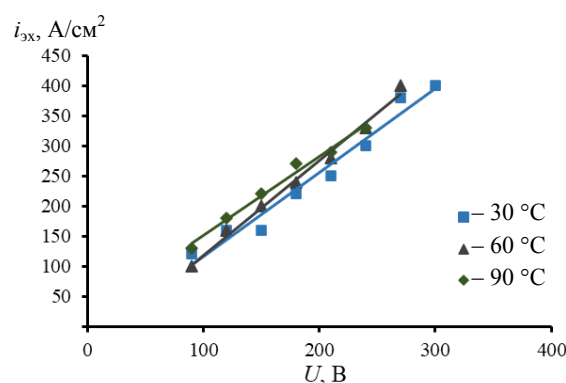


Рис. 4. Влияние напряжения на плотность тока электрохимической стадии процесса при различных значениях температуры электролита

Fig. 4. Effect of voltage on current density of electrochemical stage of process at different values of electrolyte temperature

Величина $t_{\text{эх}}$, которая фактически определяет время установления электролитно-плазменной стадии от начала включения напряжения, зависит от импульсных характеристик процесса (длительность импульса, амплитуда, коэффициент заполнения), а также от температуры и состава электролита. На рис. 5 представлены зависимости длительностей электрохимической $t_{\text{эх}}$ и электролитно-плазменной $t_{\text{эп}}$ стадий процесса от длительности импульса t при различных значениях коэффициента заполнения, полученные при напряжении 100 В, концентрации 20 % и температуре 90 °С. В исследуемом диапазоне значений длительности импульса (от 0,45 до 5,00 мс) наблюдается плавное увеличение длительности электрохимической стадии (или времени установления электролитно-плазменной стадии) — значение $t_{\text{эх}}$ в зависимости от коэффициента заполнения меняется от 0,03–0,15 до 0,25–0,40 мс (рис. 5а).

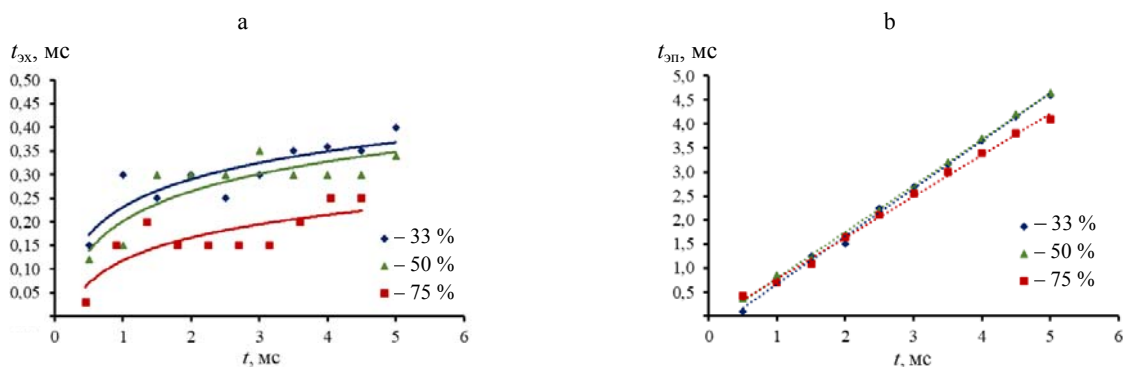


Рис. 5. Влияние длительности импульса на длительность стадий процесса

при различных значениях коэффициента заполнения: а – электрохимическая стадия; б – электролитно-плазменная стадия

Fig. 5. Effect of pulse duration on duration of process stages at different values of filling factor:

a – electrochemical stage; b – electrolyte-plasma stage

Причем наиболее интенсивный рост $t_{\text{эх}}$ наблюдается при минимальных значениях длительности импульсов t . Данный характер зависимости можно объяснить термодинамическими особенностями процесса ЭПО. Так, условием возникновения электролитно-плазменной стадии является формирование вокруг образца стабильной парогазовой оболочки – кипящего слоя с высокой напряженностью электрического поля, в котором происходят ионизация паров и возникновение разрядов. Для формирования парогазовой оболочки требуются некоторое время ($t_{\text{эх}}$) и расход энергии. В условиях импульсного электролитно-плазменного процесса вокруг поверхности образца происходят чередующиеся образование и затухание парогазовой оболочки. Чем больше пауза между высокоэнергетическими пиками электрохимической стадии, энергия в которой за счет большой силы тока в разы превышает энергию электролитно-плазменной стадии, тем больше теплоты успевает перейти от приповерхностной зоны образца в объем электролита и тем больше времени и энергии требуется для возникновения электролитно-плазменного процесса во время последующего импульса.

Существенное влияние на длительность электрохимической стадии оказывает коэффициент заполнения, который определяется как отношение времени действия импульса к периоду следования. С увеличением коэффициента заполнения длительность пауз между импульсами уменьшается, поэтому время и энергия, необходимые для возникновения электролитно-

плазменного процесса во время последующего импульса, также уменьшаются (рис. 5а).

Электролитно-плазменная стадия протекает в течение большей части времени импульса (при исследованных параметрах от 60 до 94 %). Поэтому ее длительность $t_{\text{эп}}$ соизмерима с длительностью самого импульса. Значение $t_{\text{эп}}$ увеличивается с повышением длительности импульса t по близкой к линейной закономерности и практически не зависит от коэффициента заполнения (рис. 5б).

Так же, как и при традиционной ЭПО с применением постоянного тока, в импульсном процессе ЭПО величина напряжения подаваемого импульса и температура электролита оказывают определяющее влияние на условия формирования парогазовой оболочки, т. е. на изменение длительности электрохимической стадии. Чем больше напряжение импульса и выше температура электролита, тем меньше энергии и времени требуется для формирования парогазовой оболочки вокруг образца и возникновения электролитно-плазменной стадии, соответственно тем меньше продолжительность электрохимической стадии. Зависимости длительности электрохимической стадии от напряжения обработки при различных значениях температуры электролита (концентрация электролита 20 %, длительность импульса 5 мс) представлены на рис. 6. При обработке в холодном электролите (30 °С) при напряжении 90 В электрохимическая стадия занимает всю длительность импульса – 5 мс. Электролитно-

плазменная стадия возникает при увеличении напряжения импульса до 120 В ($t_{\text{эх}} = 3,75$ мс). С дальнейшим увеличением напряжения до 300 В длительность электрохимической стадии уменьшается до 2 мс. При значениях температуры электролита 60 и 90 °С электролитно-плазменная стадия возникает уже при напряжении импульса 90 В. Причем в случае обработки в электролите с температурой 90 °С длительность электрохимической стадии составляет незначительную часть длительности всего импульса (8 %) и уменьшается с 0,4 до 0,18 мс при увеличении напряжения с 90 до 240 В.

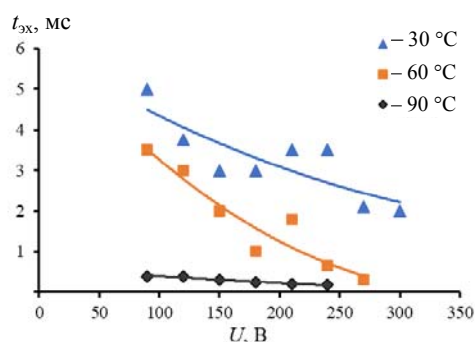


Рис. 6. Влияние напряжения на длительность электрохимической стадии процесса при различных значениях температуры электролита

Fig. 6. Effect of voltage on duration of electrochemical stage of process at different values of electrolyte temperature

С повышением концентрации электролита наблюдается уменьшение длительности электрохимической стадии, т. е. происходит более быстрое формирование парогазовой оболочки. На рис. 7 представлена зависимость длительности электрохимической стадии $t_{\text{эх}}$ от концентрации при температуре электролита 90 °С. Чем больше концентрация электролита, тем лучше его проводимость и соответственно больше плотность тока в электрохимическом процессе. Поэтому время установления электролитно-плазменной стадии с увеличением концентрации электролита уменьшается. Добавление 1 % лимонной кислоты в качестве комплексобразующего компонента при низкой концентрации электролита привело к увеличению длительности электрохимической стадии, что связано с уменьшением проводимости электролита и плотности тока.

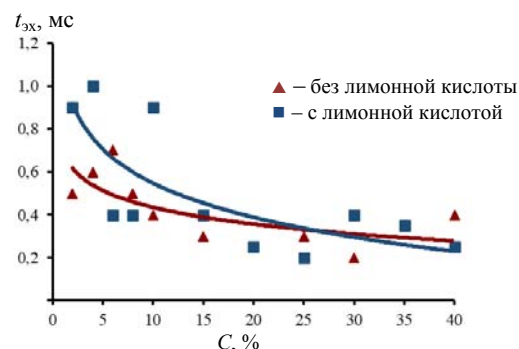


Рис. 7. Влияние концентрации электролита на длительность электрохимической стадии

Fig. 7. Effect of electrolyte concentration on duration of electrochemical stage

Для оценки эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного ЭПО при постоянном напряжении выполнен расчет энергозатрат, необходимых для съема равного слоя металла с поверхности образца. Обработку образцов площадью 0,42 см² с применением двух методов выполняли с длительностью, необходимой для уменьшения их диаметра с 1,80 до 1,70 мм (съем 100 мкм). ЭПО выполняли при следующих параметрах: напряжение 160 В, концентрация электролита 4 %, температура электролита 80 °С. Импульсную ЭПО проводили при тех же параметрах, при этом длительность импульса составляла 5 мс с периодом следования 6 мс. Время, необходимое для уменьшения диаметра образца на 100 мкм, составило: 769 с – для ЭПО с применением постоянного тока (скорость съема 7,8 мкм/мин); 150 с – для импульсного ЭПО (40,0 мкм/мин). Таким образом, скорость съема в импульсном процессе ЭПО больше чем в пять раз превышает скорость съема в традиционном процессе ЭПО с применением постоянного тока.

Расчет энергии, потребляемой в импульсе, показал, что в высокоэнергетическом пике электрохимической стадии, когда происходит основной съем металла за счет высокой плотности тока, мощность достигала значения 1600 Вт. Мощность в электролитно-плазменной стадии составляла 34 Вт (рис. 8а). Суммарные затраты энергии, необходимой для уменьшения диаметра образца на 100 мкм, в импульсном процессе на 19 % меньше, чем в традиционном процессе при постоянном напряжении. При этом в структуре энергозатрат импульсного процесса 83 % занимает электрохимическая стадия, обеспечивающая высокую производительность процесса (рис. 8б).

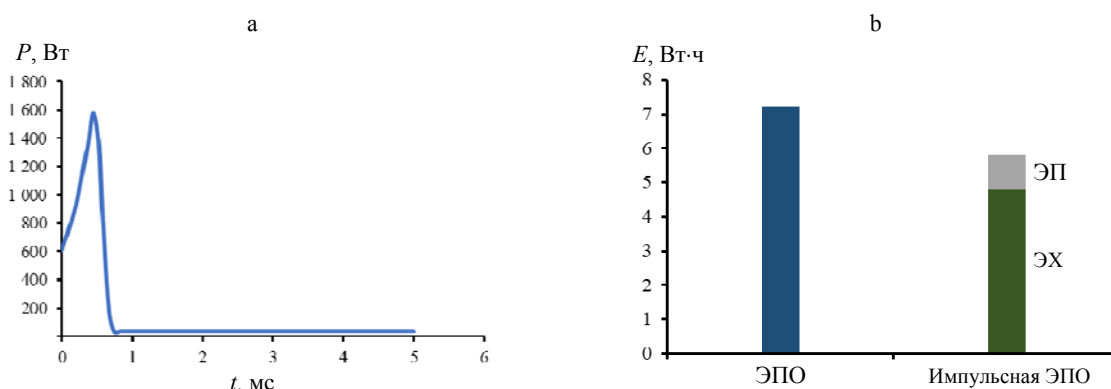


Рис. 8. Результаты расчета эффективности использования импульсного процесса электролитно-плазменной обработки: а – изменение потребляемой мощности во время действия импульса; б – затраты электроэнергии в импульсном и традиционном процессах электролитно-плазменной обработки

Fig. 8. Results of calculating efficiency of using pulsed electrolyte-plasma treatment process: a – change of consumed power during pulse; b – electricity consumption in pulsed and traditional electrolyte-plasma treatment

Образцы изделий из коррозионно-стойкой стали после полирования в импульсном процессе ЭПО представлены на рис. 9.



Рис. 9. Образцы изделий из коррозионно-стойкой стали после полирования в импульсном процессе электролитно-плазменной обработки

Fig. 9. Samples of products made of corrosion-resistant steel after polishing in pulsed electrolyte-plasma treatment process

ВЫВОДЫ

1. Разработан новый импульсный метод полирования и размерной обработки металлических материалов (импульсная электролитно-плазменная обработка), обеспечивающий снижение энергоемкости и повышение эффективности по сравнению с традиционной электролитно-плазменной обработкой с применением постоянного напряжения.

2. Высокая эффективность метода импульсной электролитно-плазменной обработки достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с высокой плотностью тока и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности.

3. Скорость съема металла в разработанном импульсном процессе электролитно-плазменной обработки больше чем в пять раз превышает скорость съема в процессе электролитно-плазменной обработки с применением постоянного напряжения и составляет 40 мкм/мин, при этом энергетические затраты на реализацию импульсного процесса на 19 % меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu [et al.] // Mechanics. 2021. Vol. 27, No 1. P. 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
2. Aliakseyeu, Y. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Y. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // Proceedings of the 14th International Scientific Conference “CO-MAT-TECH-2006”. Trnava, 19–20 Oct. 2006. Slovakia, 2006. P. 6.
3. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler [et al.] // Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan: Procedia CIRP 42, 2016. P. 503–507. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.240>.
4. Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution / V. P. Kazachenko [et al.] // International Conference on Industrial Tribology. India: Bangalore, 2006. P. 55.
5. Формирование конических изделий малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки / Ю. Алексеев [и др.] // Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, 20–22 Sept., 2017. Lithuania, 2017. P. 47–54.
6. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.

7. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.
8. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
9. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 11. С. 85–90.
10. Исаевич, Л. А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12X18H10T волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л. А. Исаевич, Ю. Г. Алексеев А. Ю. Королёв // Вестник БНТУ. 2005. № 6. С. 30–33.
11. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющих сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королёв // Сб. тр. IV Междунар. симп. по теоретич. и приклад. плазмохимии, 13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия. Иваново: Ивановский гос. хим.-технол. ун-т, 2005. Т. 2. С. 406–409.
12. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / Ю. О. Лисовская [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
13. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
14. Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257>.

Поступила 04.02.2021

Подписана в печать 06.04.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Minchenya V., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. (2021) Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanics*, 27 (1), 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
2. Aliakseyeu Y., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *Proceedings of the 14th International Scientific Conference "CO-MAT-TECH-2006"*. Trnava, 19–20 Oct. 2006. Slovakia, 6.
3. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., Schubert A. (2016) Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range. *Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan, Procedia CIRP, 42, 503–507. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.240>.
4. Kazachenko V. P. [et al.] (2006) Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological

- Solution. *International Conference on Industrial Tribology*. India, Bangalore, 55.
5. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S. (2017) Formation of Small-Diameter Conical Products by Method of Dimensional Electrolytic-Plasma Treatment. *Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, Sept. 20–22, 2017*, 47–54 (in Russian).
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
7. Alekseev Y. G., Korolyov A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Manufacturing Technology of Flexible Ultra Sonic Concentrators-Instruments*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
8. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68> (in Russian).
9. Alekseev Yu. G., Isaevich L., Korolyov A. Yu., Niss V. S. (2012) Investigation of the Effect of Intermediate Electrolyte-Plasma Treatment during Deformation Strengthening by Drawing. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (11), 85–90 (in Russian).
10. Isaevich L. A., Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu. (2005) Investigation of the Process of Obtaining High-Strength Wire from Steel 12X18H10T by Drawing with Electrolytic-Plasma Surface Treatment. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (6), 30–33 (in Russian).
11. Semchenko N. I., Korolyov A. Yu. (2005) Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steels after Electrolyte-Plasma Polishing. *Sb. Tr. IV Mezhdunar. Simp. po Teoretich. i Priklad. Plazmokhimii, 13–18 Maya 2005 g., Ivanovo, Rossiya. T. 2* [Proceedings of the IV International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, Ivanovo, Russia. Vol. 2]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 406–409 (in Russian).
12. Lisovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S., Fomikhina I. V. (2008) Effect of Electrolytic-Plasma Treatment on the Structure and Properties of the Surface Layer of 12X18H10T Steel. *Vesti Natsyynal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seriya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (3), 24–29 (in Russian).
13. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment of Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
14. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S. (2018) Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-246-257> (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 06.04.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>

УДК 531.781.2

Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов

Асп. К. Ю. Быков¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, И. М. Шаталов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Представлена математическая модель, разработанная для расчета силового воздействия на пуансон в процессе скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов в условиях плоской деформации. Для решения этой задачи процесс разделяли на две стадии: разгона и торможения. Стадия торможения состоит из двух этапов. Отличительной особенностью стадии разгона является то, что она позволяет провести анализ обратного выдавливания, в процессе которого металл течет в направлении, противоположном ходу пуансона. Приведена методика расчета усилия, действующего на пуансон на каждой стадии процесса пластического течения биметаллической заготовки в матричную полость с тремя очагами деформации. В ходе решения задачи в квазистатической постановке и исходя из условий минимальной мощности внутренних сил получены уравнения для расчета оптимальных параметров поля α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , зависящих от коэффициентов вытяжки λ и коэффициента трения μ . Уравнения, полученные в рамках разработанной модели, являются достаточно корректными, так как позволяют определять минимальное усилие, действующее на пуансон. Рассматриваемая модель расчета и уравнения могут быть использованы при разработке промышленной технологии скоростного комбинированного горячего выдавливания плоскоступенчатых биметаллических резцов.

Ключевые слова: дорожные резцы, ударное выдавливание, комбинированное выдавливание, режим деформирования, скоростное выдавливание, математическая модель, оптимальный режим

Для цитирования: Быков, К. Ю. Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>

Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks

К. Y. Bykov¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, I. M. Shatalov¹⁾

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

Abstract. The paper presents a mathematical model developed for calculating the force effect on the punch in the process of high-speed combined hot extrusion of bimetallic road milling picks under plane deformation conditions. To solve the problem, the process is divided into two phases: acceleration phase and braking phase, which consists of two stages. A distinctive feature of the acceleration phase is that it allows the analysis of reverse extrusion, in the process of which the metal flows in the opposite direction to the punch stroke. A method for calculating the force acting on the punch at each phase of the process of plastic flow of a bimetallic workpiece into a matrix cavity with three deformation zones is presented in the paper. While solving the problem in a quasi-static formulation and proceeding from the conditions of the minimum power of internal forces, equations have been obtained for calculating the optimal field parameters α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , depending on the elongation coefficients λ and the friction coefficient μ . The equations obtained within the framework of the developed model are quite correct, since they allow determining the minimum force acting on the punch. The considered calculation model and equations can be used in the development of industrial technology for high-speed combined hot extrusion of flat-step bimetallic road milling picks.

Keywords: road milling pick, impact extrusion, combined extrusion, deformation mode, high-speed extrusion, mathematical model, optimal mode

For citation: Bykov K. Y., Kachanov I. V., Shatalov I. M. (2021) Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks. *Science and Technique*. 20 (4), 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295> (in Russian)

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Введение

Современное промышленное производство Республики Беларусь не в полной мере обеспечивает отдельные отрасли народного хозяйства необходимым инструментом, к которому относятся и дорожные резцы, применяемые при строительстве и ремонте дорог. Поэтому такого рода инструмент импортируется из-за рубежа по мировым ценам.

Решением данной проблемы могут стать разработка и использование наукоемких технологий обработки материалов, обеспечивающих (с одновременным снижением энерго- и ресурсозатрат) повышение эксплуатационных качеств получаемых изделий – износостойкости и длительности рабочего ресурса. В этой связи технологии, основанные на высоких скоростях деформации, такие как скоростное комбинированное горячее выдавливание (СКГВ), обладают большими возможностями. Одно из преимуществ СКГВ – возможность получения высокоточных неразъемных биметаллических деталей в сочетании со значительной экономией высоколегированных штамповых сталей (до 90 %). Однако отсутствие теоретической базы, дающей представление о реальных условиях работы инструмента, не позволяет дать толчок промышленному развитию этого процесса [1–4].

Цель исследования – создание теоретической базы, описывающей процесс скоростного комбинированного выдавливания плоскоступенчатых биметаллических дорожных резцов.

Основная часть

Реализация процесса изготовления дорожных резцов заключается в скоростном деформировании предварительно нагретых составных заготовок (рис. 1), состоящих из корпуса резца и его рабочей части. Основой заготовки (корпуса резца) может служить конструкционная легированная сталь 40Х или 5ХНМ, а в качестве рабочей части (наконечника) – быстрорежущие стали Р18, Р6М5, а также высоколегированные штамповые стали ДИ23, 5ХНМ, 3Х2В8Ф [2, 5].

Для теоретического исследования процесса СКГВ биметаллических дорожных резцов

необходимо разработать модель динамического взаимодействия системы «пуансон – деформируемая заготовка». В основу решения поставленной задачи положен приближенный энергетический метод (метод верхней оценки), основанный на использовании кинематически возможного поля скоростей. Преимущества этого метода в том, что в нем могут одновременно применяться как аналитические, так и графические способы решения, а точность результатов определяется расхождением механических характеристик материалов и условий трения.

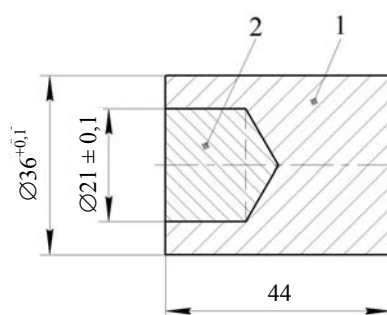


Рис. 1. Схема соединения заготовки:

1 – корпус резца; 2 – рабочая часть

Fig. 1. Workpiece connection scheme:

1 – milling pick body; 2 – working part

Для расчета усилия, воспринимаемого пуансоном, используем кинематически возможное поле скоростей, преобразованное из действительного непрерывного поля линий скольжения (рис. 2а) путем линейной аппроксимации. Принятое поле скоростей состоит из недеформируемых блоков 0–7, где пластические области сосредоточены в треугольных зонах 2, 4, 6, и характеризуется постоянными значениями скорости и ускорения для всех точек указанных блоков относительно неподвижной области [6, 7].

Теоретический анализ процесса проводили при следующих основных допущениях: упругие деформации инструмента равны нулю; деформируемая среда – однородная, жесткопластическая, изотропная и отвечающая условию пластичности Губера – Мизеса; скорость деформирования и силы инерции не оказывают влияния на вид поля скоростей (квазистатическая задача) и кинематику формоизменения (псевдостационарное течение) [1, 2, 8, 9].

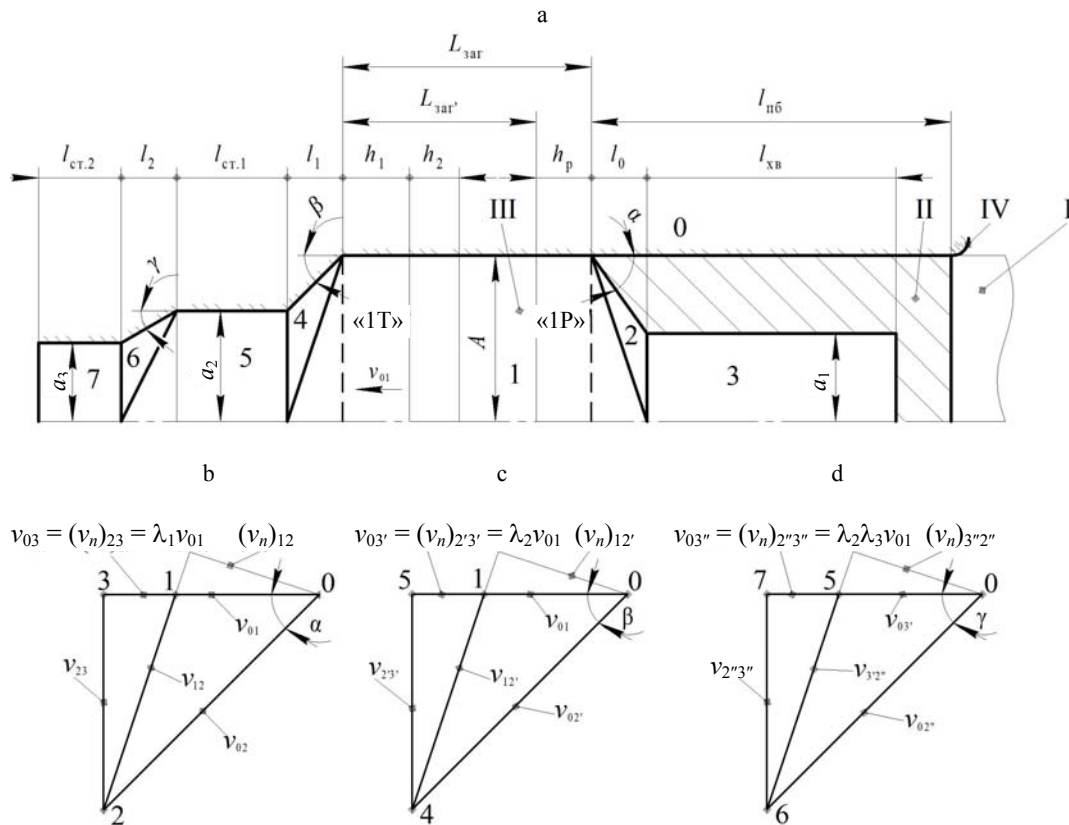


Рис. 2. Кинематически возможное поле скоростей (а) и соответствующие ему годографы скоростей (b, c, d) при скоростном выдавливании биметаллических резцов:

I – пуансон; II – промежуточный боек; III – заготовка; IV – полуматрица

Fig. 2. Kinematically possible velocity field (a) and corresponding hodographs of velocities (b, c, d) at high-speed extrusion of bimetallic milling picks:

I – punch; II – intermediate striker; III – workpiece; IV – semi-matrix

Усилие, действующее на пуансон в процессе СКГВ, найдем, используя уравнение баланса мощностей внутренних и внешних сил [2]

$$W_{\text{п}} = W_{\text{с.с}} = W_{\text{соб}} + W_{\text{дин}} \pm W_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{п}}$ – мощность движущегося пуансона; $W_{\text{с.с}}$ – то же суммарная сил сопротивления; $W_{\text{соб}}$ – то же сил собственного сопротивления металла деформированию; $W_{\text{дин}}$ – то же от действия динамических напряжений на поверхностях разрыва скоростей; $W_{\text{ин}}$ – то же локальных сил инерции движущейся заготовки.

В (1) мощность $W_{\text{ин}}$ – знакопеременная величина [2]. На начальной стадии процесса – стадии разгона, которая реализуется на пути перемещения пуансона h_p (рис. 3d), когда происходит формирование хвостовой части резца, сопровождаемое течением металла в обратном направлении, – локальные силы инерции на-

правлены в сторону, противоположную ходу движения пуансона I и промежуточного бойка II, что обусловлено ускоренным течением частиц металла в блоках 1–3. Вследствие этого часть мощности $W_{\text{п}}$ затрачивается на преодоление сопротивления от действия указанных сил. Поэтому стадия разгона характеризуется тем, что величина $W_{\text{ин}}$ в (1) берется со знаком плюс.

На основании многочисленных экспериментальных исследований [1, 6, 7, 10] установлено, что характерной особенностью стадии разгона является резкое нарастание усилия $P_{\text{п}}$, действующего на пуансон со стороны деформируемой заготовки практически по линейному закону (рис. 3d, участок 0–1 на силовой диаграмме $P_{\text{п}} = f(h_p)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования»). Также важно отметить, что в принятой схеме расчета на стадии разгона уравнение баланса мощностей возможно составить только в единственный момент времени, когда проис-

ходит уменьшение начальной скорости v_0 пуансона до некоторого значения v_0^* , при котором скорости пуансона, промежуточного бойка и части деформируемой заготовки (рис. 2а, зона «1Р») выравниваются и величина усилия, действующего на пуансон, достигает значения, характеризуемого точкой 1 на силовой диаграмме $P_n = f(h_n)$ (рис. 3д).

Для конечной стадии процесса – стадии торможения – принимается, что выравнивание скоростей пуансона I, промежуточного бойка II и части деформируемой заготовки (рис. 2а, зона «1Т») происходит одновременно с дополнительным возрастанием усилия относительно достигнутого в точке 1 на 10–12 % (рис. 3д,

участок 1–1' на графике $P_n = f(h_n)$) до некоторого максимального значения, характеризуемого точкой 1'. При этом будем считать, что сформированная система, состоящая из пуансона I, промежуточного бойка II и оставшейся части заготовки «1Т», начинает двигаться замедленно с начальной скоростью v_0^* и с одинаковым ускорением, а действующие при этом в заготовке силы инерции направлены по ходу движения системы «пуансон – промежуточный боек – заготовка» и снижают сопротивление для движущегося пуансона. На основании этого мощность от действия сил инерции $W_{ин}$ на стадии торможения в уравнении (1) берется со знаком минус.

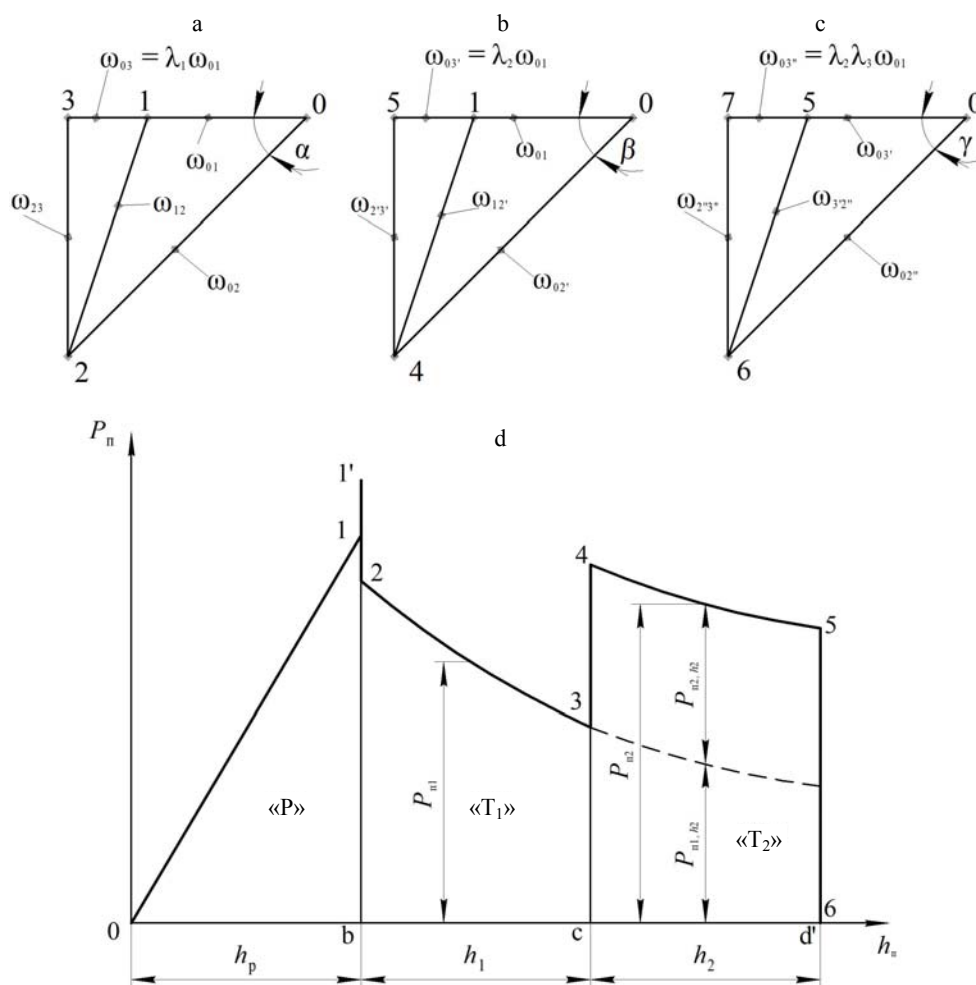


Рис. 3. Годографы ускорений (а, б, с) и силовая диаграмма $P_n = f(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования» (д) при скоростном выдавливании плоских биметаллических резцов: «Р» – стадия разгона; «Т₁», «Т₂» – первый и второй этапы стадии торможения

Fig. 3. Acceleration hodographs (a, b, c) and force diagram $P_n = f(h_n)$ “force on punch – deformation path” (d) at high-speed extrusion of flat bimetallic milling picks: “Р” – acceleration phase; “Т₁”, “Т₂” – first and second stages of inhibition phase

Определим величины, входящие в (1). Мощность $W_{\text{п}}$ пуансона, движущегося со скоростью v_0 , установим из выражения [2]

$$W_{\text{п}} = P_{\text{п}} v_0 = p_{\text{п}} 2Abv_0, \quad (2)$$

где $P_{\text{п}}$, $p_{\text{п}}$ – усилие и давление, действующие со стороны пуансона на заготовку; $2A$ – высота заготовки; b – ширина заготовки в плоскости, перпендикулярной направлению движения пуансона.

Величину мощности $W_{\text{собр}}$ найдем из условия

$$W_{\text{собр}} = W_{\text{раз}} + W_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{раз}}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{\text{тр}}$ – то же сил контактного трения, действующих на поверхностях контакта заготовки и инструмента.

Мощность $W_{\text{раз}}$ определим согласно зависимости

$$W_{\text{раз}} = \sum kl_{rs}bv_{rs}, \quad (4)$$

где k – пластическая постоянная; l_{rs} – длина границ смежных блоков r, s (r, s – номера блоков в принятом поле скоростей; $r = 0-2, r = 4-6$; $s = 1-7$; $r \neq s$); b – ширина проекции границы контакта в направлении, перпендикулярном физической плоскости; v_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков r, s .

Мощность $W_{\text{тр}}$, необходимая для преодоления сил контактного трения, определяется из выражения

$$W_{\text{тр}} = \sum \tau_k l_{rs}bv_{rs}, \quad (5)$$

где τ_k – касательные напряжения, возникающие при скольжении блоков относительно друг друга.

Величина касательных напряжений τ_k определяется уравнением [8]

$$\tau_k = 2\mu k, \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения на границе между блоками и инструментом ($0 \leq \mu \leq 0,577$) [2, 10].

Учитывая (4)–(6), выражение для определения мощности сил собственного сопротивления $W_{\text{собр}}$ запишется в виде

$$W_{\text{собр}} = (1 + 2\mu) \sum kl_{rs}bv_{rs}. \quad (7)$$

Согласно [8], скоростное пластическое течение частиц деформируемого материала через поверхности разрыва скорости сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, вызванного изменением количества движения, на поверхностях разрыва скорости возникают динамические напряжения $(q_{\text{дин}})_{rs}$, величина которых может быть определена зависимостью [8]

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho(v_n)_{rs} v_{rs}, \quad (8)$$

где ρ – плотность деформируемой заготовки (для составной заготовки принимается наибольшее из двух значений); $(v_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва компонента скорости.

Мощность $W_{\text{дин}}$, необходимая для преодоления динамических напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, находят следующим образом:

$$W_{\text{дин}} = \rho(v_n)_{rs} v_{rs}^2 l_{rs} b. \quad (9)$$

Силы инерции $P_{\text{ин}}$, возникающие при взаимодействии пуансона I с заготовкой III, определяются уравнением [10]

$$\bar{P}_{\text{ин}} = - \sum_{i=1}^7 m_i \bar{\omega}_i, \quad (10)$$

где m_i – масса блоков 1–7; $\bar{\omega}_i$ – вектор ускорения частиц металла в блоках 1–7.

Учитывая (10), а также наличие промежуточного бояка II, мощность $W_{\text{ин}}$ запишем в виде

$$W_{\text{ин}} = \sum_{i=1}^7 m_i \omega_i v_i + m_{\text{пб}} \omega_{\text{пб}} v_0, \quad (11)$$

где v_i – скорость движения частиц в жестких блоках 1–7; $m_{\text{пб}}$, $\omega_{\text{пб}}$ – масса и ускорение промежуточного бояка II.

Расчет слагаемых мощности внутренних сил по выражениям (3)–(11) производили с использованием полей скоростей и соответствующих им годографов скоростей и ускорений (рис. 2b–d, рис. 3a–c) для пластических областей 2, 4, 6. Для нахождения усилия $P_{\text{п}}$, действующего на пуансон, на каждой стадии процесса необходимо, используя геометрические размеры пуансона $2A$, b , коэффициенты вытяжки λ_1 , λ_2 , λ_3 , параметры поля α , β , γ , выделить границы блоков l_{rs} , определить массы

блоков m_i и установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой заготовки (v_{rs} , $(v_n)_{rs}$, v_i , ω_i) и блока 1 (v_{01} , ω_{01}) [2, 5].

Определив по годографам скоростей и ускорений кинематические параметры v_{rs} , $(v_n)_{rs}$, v_i , ω_i и используя параметры поля α , β , γ , с учетом преобразований получим зависимости для расчета усилий $P_{п.р}$, $P_{п1}$, $P_{п2}$, воспринимаемых пуансоном на соответствующих путях деформирования h_p , h_1 , h_2 (рис. 2а).

Усилия $P_{п.р}$, $P_{п1}$, $P_{п2}$, воспринимаемые пуансоном на каждой стадии процесса выдавливания, зависят от сопротивления металла деформированию. Для начальной стадии – стадии разгона (рис. 3д, область «Р») – это сопротивление обусловлено пластическим течением металла в направлении, противоположном ходу движения пуансона, через пластические области, сосредоточенные в треугольных блоках 2. Для стадии торможения, состоящей из двух этапов (рис. 3д, области «Т₁», «Т₂»), сопротивление деформированию обусловлено пластическим течением металла в направлении, совпадающем с направлением движения пуансона,

через пластические области, сосредоточенные в треугольных блоках 4 и 6. Учитывая это обстоятельство, усилие $P_{п2}$ для второго этапа стадии торможения представим в виде суммарного сопротивления деформированию, вызванного одновременным пластическим течением металла через пластические области 4 и 6.

На основании сказанного выше усилие второго этапа на стадии торможения запишется

$$P_{п2} = P_{п1,h_2} + P_{п2,h_2}, \quad (12)$$

где $P_{п1,h_2}$, $P_{п2,h_2}$ – усилия, действующие на пуансон при одновременном прохождении металла через пластические области 4 и 6.

На основании второго закона Ньютона и, принимая во внимание уравнения (3)–(12) и ускорение пуансона $\omega_{п} = \frac{P_{п}}{M}$ ($P_{п}$ – усилие, действующее на пуансон при выдавливании плоской заготовки; M – масса пуансона), запишем выражения для определения усилий, действующих на пуансон I в процессе скоростного комбинированного выдавливания заготовки III на каждом этапе процесса:

$$P_{п.р} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_1(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_2(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 2A^2 b \rho \left(F_3(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} \right)}; \quad (13)$$

$$P_{п1} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_4(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_5(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (14)$$

$$P_{п2} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_4(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_5(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A \rho} - \frac{h_p}{A} \right)} + \frac{2AbM \left\{ k \left[F_7(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_9(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2 (\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}. \quad (15)$$

В выражениях (13)–(15) функционалы $F_1(\alpha, \lambda_1, \mu)$, $F_2(\alpha, \lambda_1)$, $F_3(\alpha, \lambda_1)$, $F_4(\beta, \lambda_2, \mu)$, $F_5(\beta, \lambda_2)$, $F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_7(\gamma, \lambda_3, \mu)$, $F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3)$, $F_9(\gamma, \lambda_3)$ зависят от условий деформирования μ , λ_1 , λ_2 , λ_3 и параметров поля α , β , γ .

Функционалы $F_1(\alpha, \lambda_1, \mu)$, $F_4(\beta, \lambda_2, \mu)$, $F_7(\gamma, \lambda_3, \mu)$, входящие в (13)–(15), представляют собой квазистатическую часть усилий $P_{п.р}$, $P_{п1}$, $P_{п2}$, воспринимаемых пуансоном и обусловленных сопротивлением металла деформированию на поверхностях разрыва скорости и контактного трения в зависимости от степени внедрения пуансона в заготовку.

Функционалы $F_2(\alpha, \lambda_1)$, $F_5(\beta, \lambda_2)$, $F_8(\gamma, \lambda_2, \lambda_3)$ характеризуют возрастание динамического усилия, возникающего на поверхностях разрыва скоростей, что обусловлено изменением размеров поперечного сечения выдавливаемого резца.

Функционалы $F_3(\alpha, \lambda_1)$, $F_6(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_9(\gamma, \lambda_3)$ отражают действие инерционных сил, вызываемых воздействием заготовки на пуансон, которые могут оказывать как отрицательное (для стадии разгона), так и положительное (для стадии торможения) влияние на величину усилия.

На основании принятых допущений (квазистатическая задача, псевдостационарное течение) определим оптимальные значения параметров поля α , β , γ , при которых мощности сил собственного сопротивления ($W_{собр.р}$, $W_{собр.1}$, $W_{собр.2}$) будут принимать минимальные значения. Для этого составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_{собр.р}}{\partial \alpha} &= 0; \\ \frac{\partial W_{собр.1}}{\partial \beta} &= 0; \\ \frac{\partial W_{собр.2}}{\partial \gamma} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Решив систему уравнений (16), установили значения оптимальных углов α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} матричной полости при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов:

$$\alpha_{opt} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_1^2\mu + \lambda_1^2 - 2\lambda_1\mu - 2\lambda_1 + 1}{4\lambda_1^2\mu + 2\lambda_1^2 - 4\lambda_1\mu - \lambda_1 + 1}}, \quad (17)$$

$$\beta_{opt} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_2^2\mu + \lambda_2^2 - 2\lambda_2\mu - 2\lambda_2 + 1}{4\lambda_2^2\mu + 2\lambda_2^2 - 4\lambda_2\mu - \lambda_2 + 1}}, \quad (18)$$

$$\gamma_{opt} = \arccos \sqrt{\frac{2\lambda_3^2\mu + \lambda_3^2 - 2\lambda_3\mu - 2\lambda_3 + 1}{4\lambda_3^2\mu + 2\lambda_3^2 - 4\lambda_3\mu - \lambda_3 + 1}}, \quad (19)$$

где λ_1 , λ_2 , λ_3 – коэффициенты вытяжки; μ – коэффициент контактного трения [3, 11–13].

В результате преобразований выражений (13)–(15) и с учетом (17)–(19) получены формулы для расчета минимальных верхнеграничных усилий $P_{п.р,min}$, $P_{п1,min}$, $P_{п2,min}$, воспринимаемых пуансоном на каждом этапе процесса:

$$P_{п.р,min} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{1,opt}(\alpha, \lambda_1, \mu) + 2\mu h_p \frac{\lambda_1^2 + 1}{A} \right] + \rho v_0^2 F_{2,opt}(\alpha, \lambda_1) \right\}}{M - 2A^2 b p \left(F_{3,opt}(\alpha, \lambda_1) + h_p \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A p} \right)}; \quad (20)$$

$$P_{п1,min} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,opt}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,opt}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b p \left(F_{6,opt}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1}{A} + h_1 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A p} - \frac{h_p}{A} \right)}; \quad (21)$$

$$P_{п2,min} = \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{4,opt}(\beta, \lambda_2, \mu) + 2\mu \left(\frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_2^2}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{5,opt}(\beta, \lambda_2) \right\}}{M + 2A^2 b p \left(F_{6,opt}(\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{L_{зар'} - h_1 - h_2}{A} + h_2 \frac{\lambda_1^2}{A} + \frac{l_{пб} \rho_{пб}}{A p} - \frac{h_p}{A} \right)} + \quad (22)$$

$$+ \frac{2AbM \left\{ k \left[F_{7,\text{opt}}(\gamma, \lambda_3, \mu) + 2\mu \left(h_2 \frac{\lambda_2^2(\lambda_3^2 + 1)}{A} \right) \right] + \rho v_0^2 F_{8,\text{opt}}(\gamma, \lambda_2, \lambda_3) \right\}}{M + 2A^2 b \rho \left(F_{9,\text{opt}}(\gamma, \lambda_3) + h_2 \frac{\lambda_2^2(\lambda_3^2 + 1)}{A} \right)}.$$

Анализ показывает, что первые части выражений (20)–(22) в числителе отражают действие внешних и внутренних сил сопротивления на поверхностях разрыва скоростей и контактного трения (квазистатическая задача), зависящих от пройденного пуансоном пути деформирования. Вторая часть (20)–(22) в числителе учитывает динамическое увеличение усилия на пуансоне за счет изменения поперечного сечения деформируемой заготовки. Для стадии разгона выражение в знаменателе отражает отрицательное действие инерционных сил, направленных против хода движения пуансона, что приводит к возрастанию этого усилия. Для стадии торможения выражение в знаменателе отражает положительное действие инерционных сил, ведущее к снижению усилия при выдавливании биметаллических резцов.

Поскольку принцип решения поставленной задачи определен из условия минимальной мощности внутренних сил, установленной с использованием оптимальных параметров поля α_{opt} , β_{opt} , γ_{opt} , зависимости (20)–(22) являются вполне достоверными и позволяют получить довольно точное отражение реальных условий скоростного комбинированного выдавливания дорожных резцов. Полученные уравнения могут использоваться для расчетов при разработке промышленного процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических резцов.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель расчета энергозатрат процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических плоскоступенчатых резцов. Для повышения точности результатов расчета применен метод верхней оценки.

2. Полученные уравнения могут быть рекомендованы для расчета минимального усилия, действующего на пуансон в процессе выдавли-

вания биметаллических плоскоступенчатых дорожных резцов, а также быть основой при разработке промышленной технологии скоростного комбинированного горячего выдавливания биметаллических дорожных резцов.

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. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 198 с.
4. Капранов, В. Н. Особенности высокоскоростного горячего выдавливания формовочного инструмента повышенной точности / В. И. Капранов, В. Я. Осинных // Повышение качества и эффективности изготовления технологической оснастки методами пластического деформирования: сб. тезисов Всесоюз. науч.-техн. конф. Таллинн, 1977. С. 125–129.
5. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 1. С. 43–52.
6. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8>.
7. Тутышкин, Н. Д. Соотношение на разрывах при динамической плоской деформации / Н. Д. Тутышкин // Технология машиностроения. Тула, 1972. Вып. 29. С. 56–66.
8. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
9. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
10. Сегал, В. М. Технологические задачи теории пластичности / В. М. Сегал. Минск: Наука и техника, 1977. 254 с.
11. Ренне, И. П. Учет сил инерции при плоском выдавливании полосы через клиновые матрицы / И. П. Ренне, Н. Д. Тутышкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1972. № 6. С. 144–147.

12. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. М.: Наука, 1988. 654 с.
13. Качанов, И. В. Определение усилия в процессе ударного выдавливания плоских стержневых изделий / И. В. Качанов, О. М. Дьяконов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 1. С. 77–81.

Поступила 11.03.2021

Подписана в печать 25.05.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

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. Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Sharii V. N. (2011) *High-Speed Hot Extrusion of Core Products with Butt End Cladding*. Minsk, Belarusian National Technical University. 198 (in Russian).
4. Kapranov V. N., Osinnykh V. Ya. (1977) Specific Features of Enhanced Accuracy Moulder Tool for High-Speed Hot Extrusion. *Povyshenie Kachestva i Effektivnosti Izgotovleniya Tekhnologicheskoi Osnastki Metodami Plasticheskogo Deformirovaniia: Sb. Tez. Vsesoiuz. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Improvement of Quality and Efficiency in Manufacturing of Machine-Tool Attachments while Using Deformation Methods: Book of Abstracts of All-Union Scientific Research Conference]. Tallinn, 125–129 (in Russian).
5. Kachanov I. V., Vlasov V. V. (2018) Loading Regime Optimization for High-Speed Impact Extrusion of Bimetallic Flat-Step Rod Products. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (1), 77–81 (in Russian).
6. Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. (2016) Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 3–8. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8> (in Russian).
7. Tutyskhin N. D. (1972) Ratio at Discontinuities under Dynamic Planar Deformation. *Tekhnologiya Mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering]. Tula, (29), 56–66 (in Russian).
8. Tomlenov A. D. (1972) *Theory of Plastic Deformation of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ. 408 (in Russian).
9. Storozhev M. V., Popov E. A. (1977) *Theory of Metal Working with Pressure*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 423 (in Russian).
10. Segal V. M. (1977) *Technological Problems of the Plasticity Theory*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 254 (in Russian).
11. Renne I. P., Tutyskhin N. D. (1972) The Calculation of Inertia Forces in the Flat Extrusion of a Strip Through Wedge Matrices. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], (6), 144–147 (in Russian).
12. Rabotnov Yu. N. (1988) *Mechanics of a Deformable Solid Body*. Moscow, Nauka Publ. 654 (in Russian).
13. Kachanov I. V., Dyakonov O. M. (2002) Determination of the Force in the Process of Impact Extrusion of Flat Rod Products. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (1), 77–81 (in Russian).

Received: 11.03.2021

Accepted: 25.05.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-296-301>

УДК 621.873.2

Основы расчета противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клещевого механизмов

Н. М. Селивончик¹⁾, канд. техн. наук, доц. Н. Л. Нестеренко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Согласно требованиям «Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов», противоугонные устройства должны обеспечивать останов грузоподъемных кранов, находящихся под действием силы ветра, в любой точке рельсового пути, в том числе в месте стыка рельсов, соединяемых боковыми планками. Рекомендованные к применению различные типы противоугонных крановых устройств имеют ряд недостатков. Так, снабжение противоугонных крановых устройств, выполненных в виде рычажных захватов, взаимодействующих с головкой рельса, механизмами разведения-сведения захватов с электромеханическим, электромагнитным, гидравлическим или пневматическим приводами усложняет их конструкцию. Известны также противоугонные крановые устройства, у которых останов грузоподъемных кранов на рельсовом пути осуществляется стопорным эксцентриком, взаимодействующим с поверхностью головки рельса. Надежность подобных устройств недостаточна, поскольку из-за постоянного усилия пружины сила сцепления эксцентрика с рельсом не зависит от изменяющейся силы ветра. В статье предлагаются основы расчета противоугонного кранового устройства, представляющего кинематическое соединение двух механизмов – эксцентрикового и клещевого, что позволяет решить ряд перечисленных выше проблем.

Ключевые слова: грузоподъемные краны, противоугонное крановое устройство, эксцентриковый механизм, клещевой механизм, силовой расчет, коэффициент трения

Для цитирования: Селивончик, Н. М. Основы расчета противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клещевого механизмов / Н. М. Селивончик, Н. Л. Нестеренко // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 296–301. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-296-301>

Basics of Calculating Anti-Theft Crane Device from Eccentric and Tick-Borne Mechanisms

N. M. Selivonchik¹⁾, N. L. Nesterenko¹⁾

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

Abstract. According to the requirements of the “Rules for industrial safety of cranes”, anti-theft devices must ensure that cranes under the influence of wind force stop at any point on the track, including at the junction of rails connected by side strips. Various types of anti-theft crane devices recommended for use have a number of disadvantages. Thus, the supply of anti-theft crane devices made in the form of lever grips interacting with the rail head with mechanisms for disengaging and converging grippers with electromechanical, electromagnetic, hydraulic or pneumatic drives complicates their design. There are also known anti-theft crane devices, in which the stopping of cranes on a rail track is carried out by a locking eccentric interacting with the surface of the rail head. The reliability of such devices is insufficient, since, due to the constant

Адрес для переписки

Селивончик Николай Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Партизанский, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 350-71-55
selivonchik@mipk.by

Address for correspondence

Selivonchik Nikolay M.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 350-71-55
selivonchik@mipk.by

force of the spring, the adhesion force of the eccentric to the rail does not depend on the changing wind force. The paper proposes the basics of calculating the anti-theft crane device, representing the kinematic connection of two mechanisms – eccentric and thick-borne, which allows to solve a number of the above problems.

Keywords: cranes, anti-theft device, eccentric mechanism, wedge mechanism, force calculation, coefficient of friction

For citation: Selivonchik N. M., Nesterenko N. L. (2021) Basics of Calculating Anti-Theft Crane Device from Eccentric and Tick-Borne Mechanisms. *Science and Technique*. 20 (4), 296–301. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-296-301> (in Russian)

Введение

Согласно требованиям «Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов» [1], противоугонные устройства должны обеспечивать останов грузоподъемных кранов, находящихся под действием силы ветра, в любой точке рельсового пути, в том числе в месте стыка рельсов, соединяемых боковыми планками. В РД 24.09.102–01 [2] рекомендуются к применению следующие типы противоугонных крановых устройств:

- стопорные с подсоединением гибкой связи к тупиковому упору и стопоры с закладным пальцем;

- фрикционный останов с вывешиванием грузоподъемных кранов посредством выдвижного штока, снабженного эксцентриком с насечкой;

- клещевой накладной захват с заклиниванием головки рельса при его перекосе при поджатии щек захвата к рельсу винтом;

- ручной рычажный захват со встроенными в губки рычагов зажимными эксцентриками;

- универсальный рычажный захват с дистанционным управлением и вращением зажимного винта электродвигателем через снабженный муфтой предельного момента редуктор.

В губки зажимных рычагов встроены эксцентрики. Привод захвата имеет блокировки, отключающие двигатель при отклонении корпуса редуктора от вертикального положения в результате действия реактивного момента, возникающего при зажатии губками рельса или полном раскрытии захвата. Предусмотрена также блокировка, запрещающая включение привода механизма передвижения при замкнутом захвате.

Следует отметить, что снабжение противоугонных крановых устройств, выполненных в виде рычажных захватов, взаимодействующих с головкой рельса, механизмами разведения захватов с электромеханическим, электромагнитным, гидравлическим или пнев-

матическим приводами усложняет их конструкцию. Известны также противоугонные крановые устройства, у которых останов грузоподъемных кранов на рельсовом пути осуществляется стопорным эксцентриком, взаимодействующим с поверхностью головки рельса. Прижатие эксцентрика к головке рельса производится пружиной, а обратное перемещение – приводом (например, гидравлическим). Надежность подобных устройств недостаточна, поскольку из-за постоянного усилия пружины сила сцепления эксцентрика с рельсом не зависит от изменяющейся силы ветра.

В [3] предложено противоугонное крановое устройство, у которого сила сцепления эксцентрика с рельсом определяется силой ветра: чем больше сила ветра, тем больше сила сцепления. Недостатком такого решения, несмотря на простоту конструкции, является ограничение силы сцепления, удерживающей краны на рельсах весом грузоподъемных кранов. А именно – сила сцепления не может быть больше веса грузоподъемных кранов.

Авторы статьи предлагают противоугонное крановое устройство, представляющее кинематическое соединение двух механизмов – эксцентрикового и клещевого.

Основная часть

Разработанный механизм лишен недостатка устройства, конструкция которого приведена в [3], а кроме того, устраняет недостатки противоугонных устройств, указанных в [2]. Схема взаимодействия эксцентрикового и клещевого механизмов в противоугонном крановом устройстве представлена на рис. 1.

Из схемы видно, что при перемещении грузоподъемных кранов по рельсовому пути под действием силы ветра P_v в их нерабочем состоянии эксцентрик, находящийся на рельсе, поворачивается на некоторый угол и передает это движение на рычаг 3. Рычаг 3 благодаря оси

поворота, расположенной на корпусе противоугонного устройства (корпус условно не показан), и шарнирно с ним связанному ползуну, перемещаясь по прорезам 5 в корпусе противоугонного устройства, передает это усилие на тягу и клин. Связь тяги с рычагом 3 и клином обеспечивается шарнирами 10. Клин, получая вертикальное перемещение, воздействуя на ролики 11 рычагов 6, раздвигает или сдвигает рычаги, закрепляя грузоподъемные краны на рельсах или освобождая их от захвата. При достаточной жесткости рычагов захвата, обеспеченной их конструкцией, работу захвата можно считать аналогичной работе тормоза.

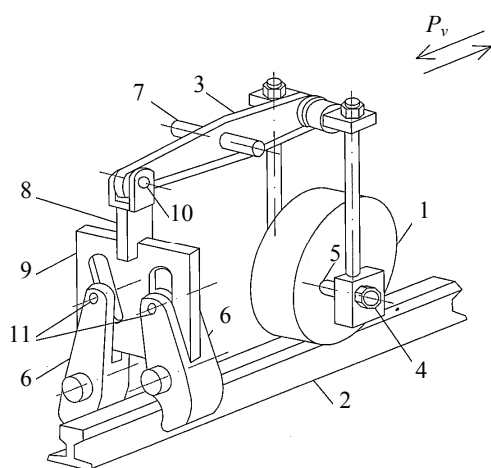


Рис. 1. Схема взаимодействия эксцентрикового и клинчатого механизмов в противоугонном крановом устройстве: 1 – эксцентрик, находящийся на рельсе; 2 – рельс кранового пути; 3 – рычаг; 4 – ползун; 5 – прорез в корпусе противоугонного устройства; 6 – рычаг захвата; 7 – ось поворота; 8 – тяга; 9 – клин; 10 – шарнир; 11 – ролик рычага захвата

Fig. 1. Scheme of eccentric and wedge mechanisms interaction in anti-theft crane: 1 – eccentric on rail; 2 – rail of crane runway; 3 – lever; 4 – slider; 5 – slit in body of anti-theft device; 6 – grab lever; 7 – rotation axis; 8 – thrust; 9 – wedge; 10 – pivot; 11 – roller of grab lever

Для силового расчета противоугонного кранового устройства, состоящего из эксцентрикового и клинового механизмов, нужно знать условия, обеспечивающие надежный останов и удержание на рельсах кранов, коэффициенты трения, значение силы ветра P_v , необходимой для трогания кранов с места, ускорение кранов a от действия силы ветра нерабочего состояния P_v , путь торможения S и время тормо-

жения кранов t , скорость кранов в конце пути v , кинетическую энергию кранов K_3 .

Условием обеспечения надежного останова и удержания кранов на рельсах силой F_y , развиваемой клещевыми захватами, является

$$F_y \geq P_v. \quad (1)$$

Сила удержания

$$F_y = N_y f_{\text{сц}} n, \quad (2)$$

где N_y – сила зажатия боковых граней головки рельса губками захватов; $f_{\text{сц}} = 0,18$ – коэффициент сцепления для закаленных губок в виде гребенки с притупленной насечкой при твердости $HRC \geq 55$ [4]; $n = 1$ (или $n = 2$) – число клещевых захватов.

Из условий (1) и (2) следует:

$$N_y \geq P_v / 0,18 = 6,66 P_v \text{ – для одного захвата;} \quad (3)$$

$$P_v / 0,36 \text{ – для двух захватов.}$$

Если принять запас силы удержания $k_c = 1,2$ по аналогии с запасом тормозной силы кранов [5], то получим условие обеспечения надежного останова и удержания кранов на рельсах с помощью рассматриваемого противоугонного устройства:

$$N_y = k_c P_v / 0,18 = 6,66 P_v \text{ – для одного захвата;} \quad (4)$$

$$N_y = k_c P_v / 0,36 = 3,33 P_v \text{ – для двух захватов.}$$

При расчете механизмов рассматриваемого противоугонного кранового устройства существенное значение имеет выбор коэффициентов трения скольжения f и трения качения μ . Например, при расчете значений приведенного коэффициента трения k , где учитываются как трение скольжения, так и трение качения, даже незначительная разница в используемых коэффициентах обеспечивает весьма ощутимую разницу получаемых результатов, поскольку этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$k = (fd + 2\mu) / D, \quad (5)$$

где D – диаметр ходовых колес грузоподъемных кранов; d – диаметр цапфы для грузоподъемных кранов с диаметром ходовых колес D .

Для значений коэффициентов трения, приводимых в справочных и информационных источниках, как правило, не оговаривают разницу между трением покоя и трением движения. Ряд авторов не дают пояснений, что коэффициент трения сцепления есть ничто иное, как коэффициент трения покоя [4, 5], о чем совершенно ясно сказано в [6]. Коэффициент трения сцепления $f_{\text{сц}}$ определяется как отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной силе N . Сила трения покоя, как правило, превышает силу трения движения. Поэтому в [7] рекомендуется при выборе коэффициентов трения различать трение покоя и трение движения, отличающиеся друг от друга на 30–50 %. Предельная сила трения при покое (момент трогания с места), предшествующая движению, превышает силу трения при движении на 50 % и более [8]. Считается, что данная разница является причиной возникновения адгезии на трущихся поверхностях и зависит от времени, чем и объясняется «застой», проявляющийся в механизмах и приборах [9, 10].

Рассматриваемое противоугонное крановое устройство не относится к механизмам, интенсивно используемым, поскольку предназначено только для восприятия давления ветра P_v при стационарном (нерабочем) состоянии грузоподъемных кранов. Ввиду этого трение покоя можно сопоставлять с трением движения путем увеличения значений коэффициентов трения скольжения и трения качения на усредненный коэффициент $k_{\text{уср}} = 1,2$. Поэтому силу ветра P_v , необходимую для трогания грузоподъемных кранов с места (начало движения грузоподъемных кранов по рельсам), можно определить исходя из ее равенства силе сопротивления движению грузоподъемных кранов $W_{\text{сопр}}$

$$P_v = W_{\text{сопр}} = G_{\text{кр}} k k_{\text{уср}} k_p + i G_{\text{кр}} = \frac{G_{\text{кр}}}{D} (fd + 2\mu) k_{\text{уср}} k_p + i G_{\text{кр}}, \quad (6)$$

где k – приведенный коэффициент трения, определяемый по (5); $G_{\text{кр}}$ – вес грузоподъемного крана; D – диаметр ходовых колес грузоподъемного крана; d – то же цапфы для грузоподъемного крана с диаметром ходовых колес D ; k_p – коэффициент, учитывающий трение реборд колес

о рельсы (табл. 1) [4]; i – уклон пути для стационарных крановых путей (табл. 2) [4]; f – коэффициент трения скольжения подшипников, приведенный к цапфе колеса грузоподъемного крана (табл. 3) [4]; μ – коэффициент трения качения стальных колес по рельсам (табл. 4) [4]; $k_{\text{уср}}$ – усредненный коэффициент, увеличивающий коэффициенты f и μ с учетом вышеизложенных соображений относительно трения покоя и трения движения.

Таблица 1

Значения коэффициента k_p
Values of coefficient k_p

Тип крана	Обод ходовых колес	Привод механизма	k_p
Опорный	Конический	Центральный	1,2
	Цилиндрический		1,5

Таблица 2

Значения уклона пути i
для стационарных крановых путей
Slope values of track i for stationary crane tracks

Тип крана	i
Мостовой	0,001
Козловой, порталный и стапельный	0,003
Железнодорожный	0,004
Строительный башенный	0,005

Таблица 3

Значения коэффициента f
Values of coefficient f

Подшипник	Значение f	
	Смазка отсутствует	Смазка густая
Скольжения: стали по стали	0,14–0,16	0,09–0,11
Качения: шариковые роликовые	0,010–0,015	
	0,015–0,020	

Таблица 4

Значения коэффициента μ
Values of coefficient μ

Головка рельса	Значение μ для диаметра ходовых колес D крана, мм				
	200; 250; 320	400; 500; 560; 630	710	800; 900	1000
Плоская	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7
Скругленная	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2

Анализ существующих диаметров ходовых колес и диаметров цапф грузоподъемных кранов позволяет сделать вывод, что отношение диаметров цапф d к диаметру ходовых колес D находится в пределах $d/D = 0,2$. Расчеты, проведенные по (6) с использованием числовых значений параметров, а также значений диаметров цапф и диаметров ходовых колес при наличии у них конических и цилиндрических ободов, подшипников скольжения и качения (шариковых и роликовых), при использовании в крановых путях рельсов с плоской и скругленной головкой, показали, что для сдвига с места мостовых, козловых, порталных, стальных, железнодорожных, строительных башенных кранов с центральным приводом при их нерабочем состоянии и отсутствии закреплений к рельсам без учета уклона крановых путей необходима сила ветра $P_v = 0,005G_{кр}$.

Ускорение грузоподъемных кранов, находящихся под действием силы P_v , можно определить по формуле

$$a = \frac{P_v}{m} = \frac{P_v}{G_{кр}} g, \quad (7)$$

где $m = \frac{G_{кр}}{g}$ – масса грузоподъемного крана;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Путь торможения грузоподъемных кранов S , пройденный с момента трогания с места и до момента их останова, можно найти с уче-

том того, что этот путь соответствует повороту эксцентрика диаметром $D_3 = 300 \text{ мм}$ при эксцентриситете $e = 60 \text{ мм}$ на угол $\varphi = 135^\circ$ (2,35 рад). Этот угол определяет начальный контакт рычагов захвата с головкой рельса. При повороте эксцентрика на угол $\varphi = 135^\circ$ его радиус изменяется от $R_{\min} = 90 \text{ мм}$ до $R_{\max} = 190 \text{ мм}$. Примем средний радиус $R_{ср} = 140 \text{ мм}$. Приведенные значения являются оптимальными для эксцентрика в рассматриваемом противоугонном крановом устройстве. Тогда путь торможения кранов

$$S = R_{ср} \varphi = 140 \cdot 2,35 = 329 \text{ мм}. \quad (8)$$

При движении грузоподъемных кранов время их торможения t и скорость в конце пути v (когда начнутся их останова-торможение) можно определить по следующим формулам:

$$t = \sqrt{2S/a}; \quad (9)$$

$$v = at. \quad (10)$$

Кинетическая энергия грузоподъемных кранов K_3 за время прохождения пути $S = 400 \text{ мм}$ при действии на краны силы P_v и скорости v определится как

$$K_3 = m \frac{v^2}{2} = \frac{G_{кр}}{g} \cdot \frac{v^2}{2}. \quad (11)$$

Значения величин P_v , a , t , v , K_3 с учетом уклонов i крановых путей приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения величин P_v , a , t , v , K_3 с учетом уклонов i крановых путей
 Values of quantities P_v , a , t , v , K_3 taking into account slopes i of crane tracks

Тип крана	Уклон кранового пути i	Значение величины				
		P_v	$a, \text{ м/с}^2$	$t, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$K_3, \text{ кг·м (Н·м)}$
Мостовой	0,001	$0,006G_{кр}$	0,059	3,68	0,22	$0,0025G_{кр}$
Козловой, порталный, стапельный	0,003	$0,008G_{кр}$	0,078	3,20	0,25	$0,0032G_{кр}$
Железнодорожный	0,004	$0,009G_{кр}$	0,088	3,02	0,27	$0,0037G_{кр}$
Строительный башенный	0,005	$0,010G_{кр}$	0,098	2,86	0,28	$0,0040G_{кр}$

ВЫВОД

На основании полученных результатов можно выполнять расчет и конструирование элементов эксцентрикового и клещевого механизмов противоугонного кранового устройства для

грузоподъемных кранов с отношением диаметров цапф d к диаметрам ходовых колес D , равным $d/D = 0,2$. При других значениях диаметров ходовых колес и цапф грузоподъемных кранов необходимо внести коррективы в формулы (6), (7), (9)–(11).

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов [Электронный ресурс]: утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 22.12.2018 № 66 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934170p&p1=1>. Дата доступа: 14.04.2021.
2. Основные требования безопасности к устройству и эксплуатации ветрозащитных систем мостовых и козловых кранов: РД 24.090.102–01 [Электронный ресурс] // Информационная система МЕГАНОРМ. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293855/4293855194.htm>. Дата доступа: 14.04.2021.
3. Наталевич, А. Н. Гравитационное противоугонное устройство крана / А. Н. Наталевич, Н. Л. Нестеренко, Л. И. Передня // Промышленная безопасность и охрана труда. 2017. № 11. С. 27–29.
4. Справочник по кранам: в 2 т. / под общ. ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. 536 с.; Т. 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов. 559 с.
5. Александров, М. П. Подъемно-транспортные машины / М. П. Александров; 6-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1985. 520 с.
6. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения: ГОСТ 27674–88. Введ. 01.01.1989. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1989. 21 с.
7. Справочник металлиста: в 3 т. / под общ. ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1965. Т. 1. С. 145.
8. Инженерный справочник. Таблицы DPVA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dpva.ru>. Дата доступа: 14.04.2021.
9. Иванов, Е. М. Работа при движении тел с трением [Электронный ресурс] / Е. М. Иванов // Современные проблемы науки и образования. 2005. № 2. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=1468>. Дата доступа: 14.04.2021.
10. Фролов, К. В. Современная трибология: итоги и перспективы / К. В. Фролов. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 480 с.

Поступила 20.04.2021

Подписана в печать 23.06.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Rules on Ensuring Industrial Safety of Hoisting Cranes: Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of December 22, 2018 No 66. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934170p&p1=1> (Accessed 14 April 2021) (in Russian).
2. Basic Safety Requirements for the Design and Operation of Wind Protection Systems for Bridge and Gantry Cranes: RD [Guidance Documents] 24.090.102–01. *MEGANORM Information System*. Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293855/4293855194.htm>. (Accessed 14 April 2021) (in Russian).
3. Natalevich A. N., Nesterenko N. L., Perednya L. I. (2017) Gravity Crane Anti-Theft Device. *Promyshlennaya Bezopasnost' i Okhrana Truda* [Industrial Safety and Labor Protection], (11), 27–29 (in Russian).
4. Gokhberg M. M. (ed.) (1988) *Crane Handbook. Vol. 1. Material and Load Characteristics. Basics of Calculating Cranes, their Drives and Metal Structures*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 536 p.; *Vol. 2. Characteristics and Design Diagrams of Cranes. Crane Mechanisms, their Parts and Assemblies. Technical Operation of Cranes*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 559 p. (in Russian).
5. Aleksandrov M. P. (1985) *Lifting-Transport Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 520 (in Russian).
6. State Standard 27674–88. *Friction, Wear and Lubrication. Terms and Definitions*. Moscow, Committee for Standardization and Metrology of the USSR, 1988. 21 p. (in Russian).
7. Acherkan N. S. (ed.) (1965) *Metalworker's Handbook. Vol. 1*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 145 (in Russian).
8. *Engineering Handbook. Tables DPVA*. Available at: <https://dpva.ru>. (Accessed 14 April 2021) (in Russian).
9. Ivanov E. M. (2005) Work when Moving Bodies with Friction. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (2). Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=1468>. (Accessed 14 April 2021) (in Russian).
10. Frolov K. V. (2008) *Modern Tribology: Results and Prospects*. Moscow, LKI Publ. 480 (in Russian).

Received: 20.04.2021

Accepted: 23.06.2021

Published online: 30.07.2021

Прочность гибкой оболочки пневматической рессоры

Доктора техн. наук, профессора В. Г. Маслиев¹⁾, А. В. Фомин²⁾,
канд. техн. наук, доц. А. А. Ловская³⁾, докт. фил. А. О. Маслиев¹⁾,
доктора техн. наук, профессора Н. И. Горбунов⁴⁾, В. В. Дущенко¹⁾

¹⁾Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (Харьков, Украина),

²⁾Государственный университет инфраструктуры и технологий (Киев, Украина),

³⁾Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (Харьков, Украина),

⁴⁾Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля (Северодонецк, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021

Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Исследована прочность гибкой оболочки пневматической рессоры транспортного средства при движении относительно рельсовой колеи. Расчет проведен с использованием метода конечных элементов, реализованного в среде программного обеспечения SolidWorks. Для этого воспроизведены чертежи пневморессоры баллонного типа в формате 3D. Особенностью конструкции является то, что расстояние между верхним и нижним днищами в статике неизменно – благодаря регулятору положения кузова, который поддерживает его постоянство относительно рамы тележки. Полученные результаты позволили сделать вывод, что имеются определенные резервы по уровню напряжений, т. е. дополнительно к вертикальным возможно учесть еще и поперечные взаимные смещения днищ пневморессоры, которые будут возникать при смещениях тележки относительно кузова. На последующем этапе исследованы напряжения в материале гибкой оболочки в случае взаимных поперечных смещений днищ, наблюдающиеся при поперечных смещениях тележек относительно кузова транспортного средства во время движения по кривым участкам пути. При этом наибольшие напряжения в материале гибкой оболочки пневморессоры составляют около 11 МПа даже при вдвое большем номинальном давлении воздуха и поперечных взаимных смещениях днищ 40 мм, т. е. они значительно меньше разрывной прочности (30 МПа). Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что конструкция и параметры гибкой оболочки пневморессоры баллонного типа обеспечивают ее прочность при эксплуатационных схемах нагружения. Поэтому с целью улучшения динамических качеств транспортных средств предлагается использовать гибкую оболочку пневморессоры как составляющую рессорной подвески.

Ключевые слова: пневморессора баллонного типа, рессорное подвешивание, оптимизация материала конструкции, моделирование, прочность, эквивалентные напряжения, демпфирование колебаний, безопасность движения

Для цитирования: Прочность гибкой оболочки пневматической рессоры / В. Г. Маслиев [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 302–309. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-302-309>

Strength of Flexible Shell of Pneumatic Springs

V. G. Masliev¹⁾, A. V. Fomin²⁾, A. A. Lovskaya³⁾, A. O. Masliev¹⁾, N. I. Gorbunov⁴⁾, V. V. Dushenko¹⁾

¹⁾National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (Kharkiv, Ukraine),

²⁾State University of Infrastructure and Technologies (Kyiv, Ukraine),

³⁾Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv, Ukraine),

⁴⁾Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Severodonetsk, Ukraine)

Abstract. The strength for a flexible shell of a vehicle pneumatic spring during movement relative to a rail track has been studied in the paper. The calculation has been carried out using the finite element method implemented in the SolidWorks software environment. For this purpose, 3D drawings of a balloon-type pneumatic spring have been reproduced. A specific

Адрес для переписки

Маслиев Вячеслав Георгиевич
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Кирпичева, 2,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 707-63-67
masliew@ukr.net

Address for correspondence

Masliev Vjacheslav G.
National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”
2, Kyrpychova str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 707-63-67
masliew@ukr.net

feature of the design is that the distance between the upper and lower bottoms in static conditions is unchanged – thanks to the body position regulator, which maintains its constancy relative to the trolley frame. The results obtained have made it possible to conclude that there are certain reserves for the level of stresses, i.e., in addition to the vertical, it is possible to take into account also transverse mutual displacements of the air spring bottoms which will occur when the trolley moves relative to the body. At the next stage, the stresses in the material of the flexible shell are investigated for mutual transverse displacements of the bottoms, which are observed with transverse displacements of the trolleys relative to the body of the vehicle when traveling along curved sections of the track. At the same time, the maximum stresses in the material of the flexible shell of the pneumatic spring are about 11 MPa, even with twice the nominal air pressure and transverse mutual displacements of the bottoms of 40 mm, that is, they are much less than the breaking strength (30 MPa). The carried out researches allow to draw a conclusion that the design and parameters of a flexible shell of a balloon-type air springs ensure its strength under operational loading schemes. Therefore, in order to improve the dynamic qualities of vehicles, it is proposed to use a flexible shell of a pneumatic spring as a component of the spring suspension.

Keywords: balloon-type air spring, spring suspension, optimization of construction material, modeling, strength, equivalent stresses, damping of vibrations, traffic safety

For citation: Masliev V. G., Fomin A. V., Lovskaya A. A., Masliev A. O., Gorbunov N. I., Dushenko V. V. (2021) Strength of Flexible Shell of Pneumatic Springs. *Science and Technique*. 20 (4), 302–309. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-302-309> (in Russian)

Введение

Несмотря на широкое распространение пневматических рессорных подвесок на скоростных поездах и грузовых автомобилях, все еще остаются вопросы, касающиеся их прочности, что сдерживает распространение на другие типы и модели транспортных средств. При этом такие внедрения могут дать значительный эффект: повысить конкурентоспособность транспортных средств благодаря эффективному воздействию мягкой пневмоподвески на сохранность путевой структуры, улучшить уровень комфорта для пассажиров [1–4]. Сказанное подтверждает, что исследования в области пневматических подвесок транспортных средств заслуживают внимания и актуальны.

Улучшение динамических характеристик транспортных средств является важной научно-прикладной проблемой. Такое утверждение обосновывается прямой связью улучшения динамических свойств транспортных средств с увеличением скоростей движения, сохранности грузов при транспортировке и уровня комфорта пассажиров. Поэтому вопросам улучшения динамических характеристик технических средств различных видов транспорта уделяется особое внимание как в научной деятельности, так и при практической реализации ее результатов. Особую роль в улучшении технико-экономических показателей функционирования и тем самым повышении уровня конкурентоспособности среди иных видов транспорта играют динамические показатели подвижного состава железных дорог. Это объясняется рядом причин, в том числе возможностью увеличения скоростей движения и грузоподъемности поездов. Соответственно постоянно проводятся

научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью улучшения динамических характеристик подвижного состава за счет внедрения различных технических средств.

Так, в [5] приведены перспективные пути улучшения технико-экономических показателей грузовых вагонов. В том числе выделено направление по улучшению их динамических свойств путем внедрения упругодемпфирующих элементов. Но при этом не приведены результаты анализа возможных конструктивных их исполнений.

Мероприятия по совершенствованию несущей конструкции кузова полувагона с целью обеспечения надежности его крепления на палубе железнодорожного паромы рассмотрены в [6]. Результаты расчетов на прочность кузова с учетом закрепления его относительно палубы за предложенные конструкционные узлы в условиях морской качки позволили сделать вывод о целесообразности предлагаемых решений. При этом создание и использование динамических моделей, которые будут учитывать износ несущей системы полувагонов, помогут проводить исследования и для соответствующих конструкций.

В [7] приведены перспективы совершенствования динамических характеристик грузовых вагонов. Улучшения таких свойств предлагается достигать путем совершенствования конструктивных показателей, например, за счет внедрения материалов с улучшенными характеристиками.

Исследования динамики железнодорожного вагона с открытой загрузочной платформой приведены в [8]. Расчет выполнен в среде программного обеспечения MSC Adams. Исследо-

вание устойчивости против опрокидывания вагона осуществлялось при его вписывании в кривую радиусом 250 м с учетом различной скорости движения.

Вопросы проектирования подвижного состава для перевозки тяжеловесных грузов рассмотрены в [9]. Исследование динамики и прочности осуществлено с помощью современных средств программного обеспечения Pro/mechanica и COSMOSWorks. При проектировании несущей конструкции транспортера исследована возможность его изготовления из разнотипных материалов.

Конструкционные особенности вагона для интермодальных перевозок рассмотрены в [10]. Вагон имеет сниженную среднюю часть, а наличие оборотной части дает возможность осуществлять загрузку/выгрузку автотехники на/с него самокатом. В [11] приведены результаты исследований характера и степени влияния различных грузовых тележек на прочностные качества несущих систем вагонов. В [12] представлено влияние профиля качения по ходу движения колес тележки на общую динамику единицы подвижного состава. В [13] анализировались особенности движения и взаимодействия единиц подвижного состава с параметрами, которые соответствуют имеющимся техническим решениям. Результаты совершенствования динамических качеств подвижного состава при прохождении кривых участков пути в случае улучшения соответствующих конструктивных элементов представлены в [14]. Наряду с этим определены возможности и влияние внедрения таких инноваций на изношенный подвижной состав.

Цель наших исследований – научное обоснование выбора современных полимерных материалов для изготовления гибких оболочек пневморессор, в частности получение удовлетворительного их напряженного состояния при статических и динамических нагрузках, которые наблюдаются на подвижном составе.

Основная часть

Гибкие оболочки пневматических рессор для транспортных средств, как правило, изготавливают из резинокорда, что уже не удовлетворяет современным требованиям относительно сроков службы в эксплуатации из-за частых случаев отделения резины от корда и разрывов. Сейчас созданы новые полимерные материалы,

которые имеют преимущества по характеристикам прочности, упругости и другим по сравнению с резинокордом [15–17].

Расчеты на прочность гибких оболочек пневморессор ранее осуществляли с помощью методов сопротивления материалов и теории гибких оболочек, что позволяло получать удовлетворительные результаты [18, 19]. При этом рассматривались, как правило, гибкие оболочки, изготовленные из резинокорда, где несущей составляющей являются нити, и рассчитывались на прочность при растяжении.

Ученые и производственники Украины имеют опыт разработки и изготовления гибких оболочек из полимерных материалов для пневматических рессор.

Опытный образец пневморессоры диафрагменного типа с эффективным диаметром гибкой оболочки 0,600 м и толщиной стенки 0,008 м был изготовлен из полиуретана «Ади-прен 167» с модулем упругости $E = 15\text{--}20$ МПа и разрывной прочностью 30 МПа. Пневморессора предназначена для установки на дизель-поезд [20]. Расчеты на прочность этой гибкой оболочки проводили с использованием методики, изложенной в [19].

Расчетные относительные деформации гибкой оболочки при номинальной нагрузке не превышали 0,1 (т. е. 10 %), что, согласно закону Гука, соответствует напряжениям $\sigma = E\varepsilon = 1,5$ МПа, т. е. запас прочности достаточный и составляет 20.

Экспериментальные, максимально приближенные к натурным стендовые испытания этой пневморессоры проводили в ПАО «Лугансктепловоз». Пневморессору нагружали номинальным грузом массой 14,14 т при давлении в ее полости 0,50 МПа.

С помощью метода «хрупкого покрытия», в качестве которого использовали специальный лак, измеряли относительные деформации ε внешней поверхности гибкой оболочки и по закону Гука вычисляли соответствующие напряжения. Величины напряжений находились в интервале 1,2–1,8 МПа, т. е. совпадение с расчетами было хорошее. Наибольшие напряжения наблюдались вблизи нижнего днища пневморессоры и несколько уменьшались при приближении к экваториальной части гибкой оболочки. Кроме того, экспериментально измерялись опускания вниз нижней экваториальной части ее гофры, которые при номинальной нагрузке не превышали 3,2–3,6 мм. Это совпа-

дает с результатами расчетов оболочки на прочность и деформации [20].

Пневморессору оставили под номинальной нагрузкой на длительный срок (несколько месяцев), чтобы выявить наличие остаточных деформаций гибкой гофры. Таких деформаций не оказалось, поэтому можно рекомендовать устанавливать данную пневморессору на дизель-поезда.

Между тем конструкция пневморессор продолжает совершенствоваться. Одно из направлений заключается в улучшении их демпфирующих свойств, что упростит конструкцию рессорной подвески благодаря исключению недостаточно надежных в эксплуатации гидравлических гасителей колебаний, которые устанавливают параллельно диафрагменным пневморессорам. Это обеспечивает необходимое демпфирование колебаний кузовов на диафрагменных пневморессорах, но усложняет конструкцию.

С развитием компьютерных технологий, и в частности метода конечных элементов, появилась возможность проведения исследований гибких оболочек. Прочность пневморессоры диафрагменного типа также изучена с использованием программы SolidWorks [21]. Полученные результаты приближены к приведенным выше – это подтверждает достаточную прочность пневморессоры [22].

Разработана конструкция пневморессоры баллонного типа (рис. 1), которая в отличие от диафрагменной имеет лучшие демпфирующие качества [23].

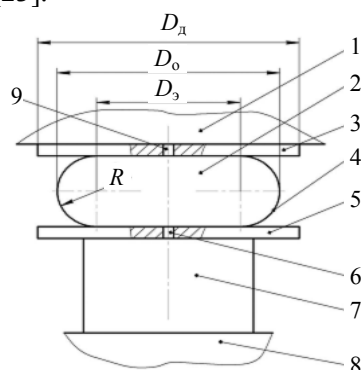


Рис. 1. Пневморессора с повышенным демпфированием колебаний: 1 – кузов транспортного средства; 2 – пневморессора; 3, 5 – днище; 4 – гибкая оболочка; 6 – дроссельное отверстие; 7 – дополнительный резервуар; 8 – рама тележки; 9 – отверстие для питания пневморессоры сжатым воздухом

Fig. 1. Pneumatic spring with increased damping of vibrations: 1 – vehicle body; 2 – pneumatic spring; 3, 5 – bottom; 4 – flexible shell; 6 – throttle opening; 7 – additional tank; 8 – trolley frame; 9 – aperture for supplying pneumatic spring with compressed air

Пневморессора имеет свойство эффективно гасить колебания кузова благодаря тому, что при ее сжатии через расположенное в днище 5 дроссельное отверстие в установленный на раме тележки дополнительный резервуар (и обратно на ходе отбоя) перетекает значительно большая, чем в диафрагменной пневморессоре, масса сжатого воздуха, что достигается благодаря выполнению диаметров D_d днищ 3 и 5, равными наружному диаметру D_o гибкой оболочки при ее полном сжатии. Это существенно отличает предложенную пневморессору от диафрагменной, содержащей на периферии гибкой оболочки кольцевую полость, из которой воздух никуда не перетекает, а следовательно, и не принимает участия в демпфировании колебаний.

Увеличение количества сжатого перетекающего воздуха также связано с тем, что при сжатии пневморессоры увеличивается эффективный диаметр D_3 ее гибкой оболочки (в пределе – к диаметру D_o), так как уменьшается ее радиус R .

При движении транспортного средства по более или дороге неровности на них возбуждают вертикальные смещения на подрессоренной части транспортного средства 8, колебания кузова, на пневморессоры, при этом днище 3 опускается вниз и сжимает воздух, находящийся в полости пневморессоры. Этот воздух перетекает через дроссельное отверстие в дополнительный резервуар, где его кинетическая энергия превращается в тепловую, которая поступает в окружающую среду через стенки дополнительного резервуара, т. е. воздух охлаждается и на обратном ходе (отбоя) в том же количестве по массе возвращается к объему пневморессоры, имея уже меньший объем и температуру, благодаря чему на ходе отбоя амплитуда смещения вверх кузова будет уменьшена. А это – демпфирование колебаний. Оно происходит тем лучше, чем большее по массе количество воздуха перетекает между пневморессорой через дроссельное отверстие в дополнительный резервуар и в обратном направлении.

Таким образом, гибкая оболочка пневморессоры воспринимает вертикальную нагрузку от сил тяжести и инерции части кузова, которая уравнивается реакцией, создаваемой благодаря давлению воздуха в ней. Кроме того, пневморессора должна допускать взаимные смещения ее днищ в плоскости пути (в пределах ± 40 мм) – при смещениях тележки относительно кузова в случае движения по кривым участкам пути вызовет деформацию растяжения в материале гибкой оболочки, поскольку

верхнее днище прикреплено к кузову, а нижнее – к раме тележки. Подобные деформации невозможны для резинокорда, поскольку нити корда почти не растягиваются. Именно поэтому специалисты создали диафрагменную гибкую оболочку, форма которой исключает деформации растяжения нитей в ее материале при поперечных смещениях тележки относительно кузова.

Современные полимерные материалы достаточно упругие и прочные. Их можно использовать вместо резинокорда для изготовления гибких оболочек баллонного типа, обладающих лучшими свойствами по реализации демпфирования колебаний.

Применение пневморессор баллонного типа с гибкими оболочками, изготовленными из резинокорда, приводило к определенным осложнениям конструкции тележек. Это связано с необходимостью предотвращать взаимное поперечное смещение их днищ, при которых возникало растяжения корда, что вызывало его разрыв и разрушение оболочки.

При изготовлении гибких оболочек из полимерных материалов корд не применяют. Поэтому предотвращать взаимное поперечное смещение днищ пневморессор не нужно, если они вызывают только упругие деформации гибких оболочек, изготовленных из полимерного материала.

Исследования и их результаты

С развитием компьютерных технологий и метода конечных элементов появилась возможность проведения исследований гибких оболочек без корда. В [24] приведены результаты исследования механических напряжений в ма-

териале гибкой оболочки пневморессоры баллонного типа (с эффективным диаметром $D_0 = 0,3$ м, радиусом гибкой оболочки $R = 0,1$ м при толщине стенки 8 мм), изготовленной из полиуретана «Адипрен 167» со следующими свойствами: модуль упругости 15–20 МПа, модуль сдвига 6,68 МПа, коэффициент Пуассона 0,496, плотность 1225,2 кг/м³, разрывная прочность 30 МПа при нагружении давлением воздуха, находящегося в полости оболочки.

С использованием программы SolidWorks [21] воспроизведены чертежи пневморессоры баллонного типа в формате 3D. Особенностью конструкции является то, что расстояние между верхним и нижним днищами в статике неизменно благодаря регулятору положения кузова, который поддерживает его постоянство относительно рамы тележки [1].

На рис. 2 изображены расчетная схема пневморессоры баллонного типа (а), сетка из конечных элементов (б), схема нагружения внутренним давлением p_v (с). Определение оптимального количества элементов сетки проведено с использованием графоаналитического метода. При этом количество узлов сетки составило 46580, элементов – 25733 с размерами 20 мм (допуск 1 мм).

На рис. 3 представлены результаты расчета напряжений в материале гибкой оболочки от действия избыточного давления воздуха $p_v = 0,5$ МПа в ее полости. Наибольшие напряжения растяжения (3,95 МПа) наблюдались в гибкой оболочке у днищ, а при приближении к экватору они несколько уменьшались (до 3,85 МПа). Увеличение радиуса экватора гибкой оболочки при этом составило 19,00 мм.

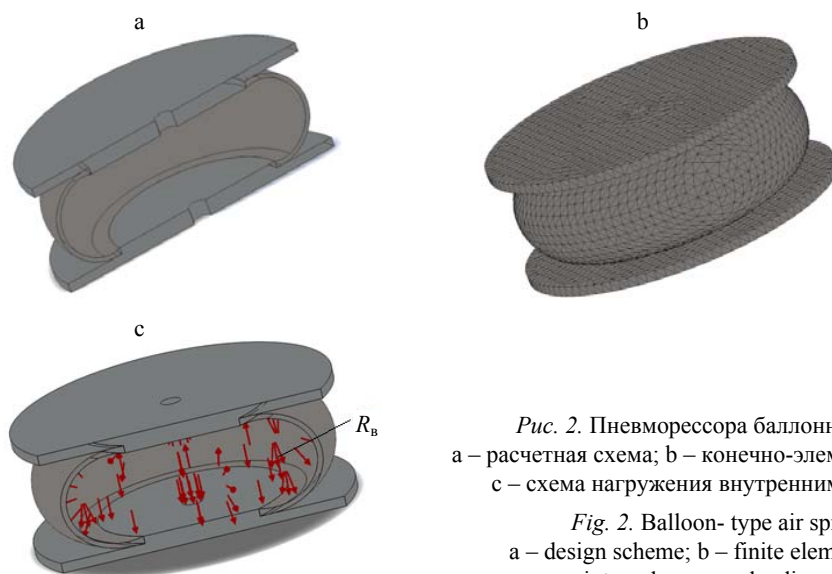


Рис. 2. Пневморессора баллонного типа:
а – расчетная схема; б – конечно-элементная модель;
с – схема нагружения внутренним давлением

Fig. 2. Balloon-type air spring:
a – design scheme; б – finite element model;
с – internal pressure loading scheme

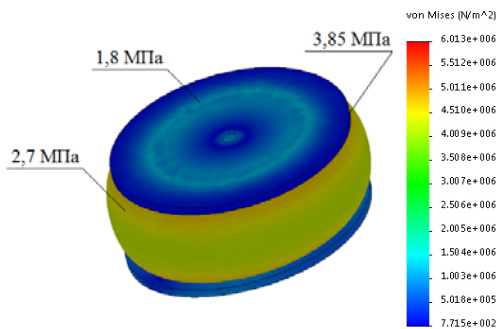


Рис. 3. Напряжения в материале гибкой оболочки от действия избыточного давления воздуха $p_a = 0,5$ МПа в ее полости

Fig. 3. Stresses in the material of a flexible shell from the action of excess air pressure $p_a = 0.5$ MPa in its cavity

На рис. 4 приведены напряжения в материале гибкой оболочки от действия избыточного давления воздуха $p_a = 1,0$ МПа в ее полости. При повышении давления воздуха вдвое напряжения растяжения растут до 7,35 МПа у днищ и до 6,84 МПа на экваторе (рис. 4), т. е. почти вдвое. Увеличение радиуса гибкой оболочки при этом составило 39,00 мм. Таким образом, напряжения в материале гибкой оболочки пневморессоры не превышают 7,35 МПа (даже при вдвое большем номинальном давлении воздуха) и значительно меньше предела прочности на разрыв (30,00 МПа).

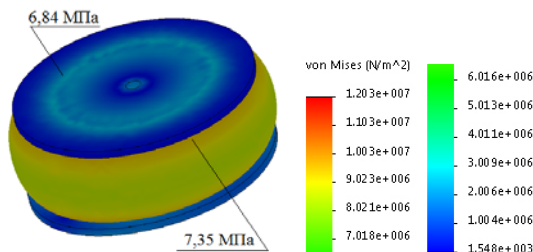


Рис. 4. Напряжения в материале гибкой оболочки от действия избыточного давления воздуха $p_a = 1,0$ МПа в ее полости

Fig. 4. Stresses in the material of a flexible shell from the action of excess air pressure $p_a = 1.0$ MPa in its cavity

Полученные результаты показывают, что существуют определенные резервы по уровню напряжений, т. е. имеется возможность добавить к вертикальным еще и поперечные взаимные смещения днищ пневморессоры, которые будут возникать при смещениях тележки относительно кузова.

Исследованы напряжения в материале гибкой оболочки при взаимных поперечных смещениях днищ, которые наблюдаются при попе-

речных смещениях тележек относительно кузова транспортного средства при движении по кривым участкам пути. Определены напряжения в материале гибкой оболочки при взаимных поперечных смещениях днищ под действием силы P_n без наличия избыточного давления (рис. 5), что соответствует движению транспортного средства в «холодном» резерве. Результаты исследования показали, что наибольшие напряжения наблюдаются на боковых сторонах гибкой оболочки: они растут от 0,76 МПа на экваторе до 0,95 МПа вблизи днищ, т. е. напряжения относительно невелики. Смещение передней части экватора гибкой оболочки при этом составило 40 мм.

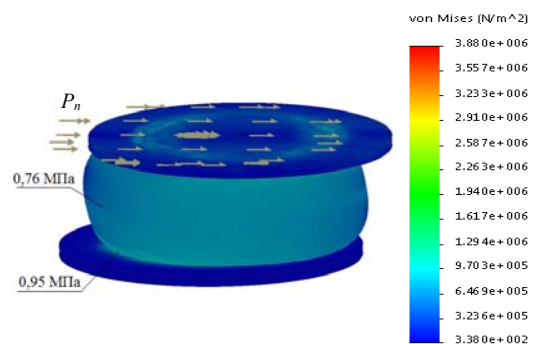


Рис. 5. Напряжения в материале гибкой оболочки без избыточного давления воздуха в ее полости при взаимных смещениях днищ 40 мм

Fig. 5. Stresses in the material of a flexible shell without excessive air pressure in its cavity with mutual displacements of the bottoms of 40 mm

На следующем этапе исследовали напряжения в материале гибкой оболочки при взаимных поперечных смещениях днищ 40 мм и наличии избыточного давления в ее полости 0,5 и 1,0 МПа (рис. 6, 7).

Как видно из рис. 6, наибольшие напряжения растяжения (5,98 МПа) наблюдаются в местах, где гибкая оболочка прикреплена к днищам (рис. 2а). У начала контакта с днищем напряжения составляют 3,94 МПа, а при приближении к экватору они уменьшаются до 3,46 МПа. Напряжения распределяются более равномерно вдоль экватора при наличии давления воздуха в полости пневморессоры, чем в случае его отсутствия. Смещение передней точки на экваторе гибкой оболочки при этом составило 46 мм в направлении смещения и 1 мм – с противоположной стороны, а в поперечном направлении – 2 мм с обеих сторон.

При повышении давления воздуха вдвое наибольшие напряжения растяжения (11,31 МПа) также наблюдаются в местах, где гибкая обо-

лочка прикреплена к днищам (рис. 2а). Напряжения растяжения увеличиваются до 7,8 МПа у контакта с днищем и до 6,96 МПа на экваторе, т. е. также почти вдвое (рис. 7). Смещение передней точки экватора гибкой оболочки при этом составило: в направлении смещения 64 мм, с противоположной стороны 16 мм, а в поперечном направлении 4 мм.

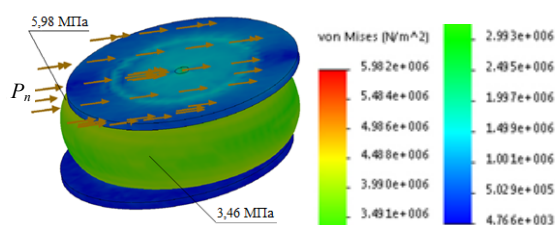


Рис. 6. Напряжения в материале гибкой оболочки при избыточном давлении воздуха в ее полости 0,5 МПа при взаимных смещениях днищ 40 мм

Fig. 6. Stresses in the material of a flexible shell with an excess air pressure in its cavity of 0.5 MPa with mutual displacements of the bottoms of 40 mm

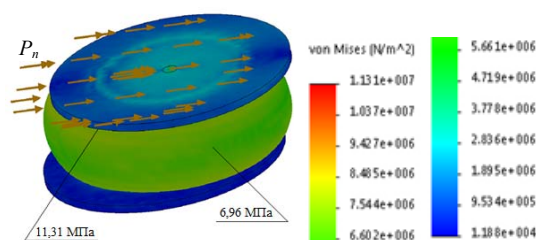


Рис. 7. Напряжения в материале гибкой оболочки при избыточном давлении воздуха в ее полости 1,0 МПа при взаимных смещениях днищ 40 мм

Fig. 7. Stresses in the material of a flexible shell at excess air pressure in its cavity of 1.0 MPa with mutual displacements of bottoms of 40 mm

Таким образом, наибольшие напряжения в материале гибкой оболочки пневморессоры составляют 11,31 МПа даже при вдвое большем номинальном давлении воздуха и поперечных взаимных смещениях днищ 40 мм. То есть они значительно меньше разрывной прочности, равной 30 МПа.

ВЫВОД

Представленные конструкции и параметры гибкой оболочки пневморессоры баллонного типа обеспечивают ее прочность. Пневморессора может быть рекомендована как упруго-демпфирующая составляющая рессорной подвески на транспортных средствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акопян, Р. А. Пневматическое поддрессирование авто-транспортных средств (вопросы теории и практики) / Р. А. Акопян. Львов: Вища шк., 1979. Ч. 1. 218 с.
2. Отечественная пассажирская тележка на пневматическом подвешивании / Б. А. Коробка [и др.] // Вагонный парк. 2010. № 6. С. 48–51.
3. Masliev, V. Studi of an Air Spring with Improved Damping of Vibration / V. Masliev, J. Makarenko, A. Masliev // Econtechmod. An International Quarterly Journnal. 2015. Vol. 4, No 4. P. 58–62.
4. Suppression of Vertikal Vibration in Railway Vehicles by Controlling the Damping Force of Primary and Secondary Suspensions / Y. Sugahara [et al.] // Quarterly Report of RTRI. 2008. Vol. 49, Iss. 1. P. 7–15. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.49.7>.
5. Fomin, O. V. Increase of the Freight Wagons Ideality Degree and Prognostication of their Evolution Stages / O. V. Fomin // Scientific Bulletin of National Mining University. 2015. Iss. 3. P. 68–76.
6. Lovska, A. A. Peculiarities of Computer Modeling of Strength of Body Bearing Construction of Gondola Car During Transportation by Ferry-Bridge / A. A. Lovska // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No 1. P. 49–54.
7. Kelrykh, M. Perspective Directions of Planning Carrying Systems of Gondolas / M. Kelrykh, O. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. 2014. No 6. P. 64–67.
8. Kolejowy Wagon Transportowy Jako Nowatorskie, Innowacyjne Rozwiązanie Konstrukcyjne do Przewozu Naczep Siodłowych i Zestawów Drogowych dla Transportu Intermodalnego / M. Nader [et al.] // Logistyka. 2014. No 4. P. 2272–2279.
9. Divya Priya, G. Modeling and Analysis of Twenty Tonne Heavy Duty Trolley / G. Priya Divya, A. Swarnakumari // Intern. J. of Innovative Technology and Research. 2014. Vol. 2, No 6. P. 1568–1580.
10. Krason, W. FE Numerical Tests of Railway Wagon for Intermodal Transport According to PN-EU Standards / W. Krason, T. Niezgoda // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2014. Vol. 62, Iss. 4. P. 843–851. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2014-0093>.
11. Determination of the Dynamic Characteristics of Freight Wagons with Various Bogie / S. Myamlin [et al.] // Transport. 2015. Vol. 30, Iss. 1. P. 88–92. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>.
12. Impact of Wheelset Steering and Wheel Profile Geometry to the Vehicle Behavior when Passing Curved Track / V. Hauser [et al.] // Manufacturing Technology. 2017. Vol. 17, No 3. P. 306–312. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/mt/17/3/306>.
13. Tartakovskiy, E. Improving the Process of Driving a Locomotive Through the Use of Decision Support Systems / E. Tartakovskiy, O. Gorobchenko, A. Antonovych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Iss. 3. P. 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80198>.
14. Proposol of a Mechanism for Setting Bogie Wheelsets to Radisl Position while Riding Along Track Curve / V. Hauser [et al.] // Manufacturing Technology. 2017. Vol. 17, No 2. P. 186–192. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/mt/17/2/186>.
15. Райт, П. Полиуретановые эластомеры / П. Райт, А. Камминг; пер. с англ. под ред. Н. П. Апухтиной. Л.: Химия, 1973. 304 с.
16. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
17. Полиуретаны в производстве искусственных материалов для одежды и обуви / К. Н. Александров [и др.]. М.: Легкая индустрия, 1977. 256 с.

18. Акопян, Р. А. Рабочие процессы и теория прочности пневматической подвески / Р. А. Акопян. Львов: Львовский университет, 1979. 222 с.
 19. Справочник машиностроителя / под ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машгиз, 1995. Т. III.
 20. Исследования и проектные работы по созданию пневмоподвешивания тележки для дизель-электропоездов с повышенными динамическими и эксплуатационными показателями: отчет о НИР (заключ.) 0108U010504, 2004. 67 с.
 21. Алямовский, А. А. SolidWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. М.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.
 22. Слипенченко, И. Н. Исследование прочности гибкой оболочки пневморессоры для дизель-поезда / И. Н. Слипенченко, В. Г. Маслиев // VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: матеріали конф., 22–24 квітня 2014 р.: у 3 ч. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1. С. 219–220.
 23. Пневматична підвіска: пат. 113641 України, МПК В 60 G 11/26 (2006.01), F 16 F 9/02(2006.01) / В. В. Дущенко, А. О. Маслієв, В. Г. Маслієв. Опубл. 10.02.2017.
 24. Маслієв, В. Г. Поліпшення комфорту пасажирів шляхом застосування удосконаленої пневматичної підвіски транспортних засобів / В. Г. Маслієв, В. В. Дущенко, А. О. Маслієв // Вагонний парк. 2018. № 1–2. С. 40–43.
- Поступила 14.05.2018
Подписана в печать 06.12.2018
Опубликована онлайн 30.07.2021
- ### REFERENCES
1. Akopyan R. A. (1979) *Pneumatic Suspension of Vehicles (Theory and Practice). Part 1*. Lvov, Vishcha Shkola Publ. 218 (in Russian).
 2. Korobka B. A. [et al.] (2010) Domestic Passenger Trolley on Pneumatic Suspension. *Vagonny Park [Wagon Fleet]*, (6), 48–51 (in Russian).
 3. Masliev V., Makarenko J., Masliev A. (2015) Study of an Air Spring with Improved Damping of Vibration. *Econ-techmod. An International Quarterly Journal*, 4 (4), 58–62.
 4. Sugahara Y., Kazato A., Takigami T., Koganei R. (2008) Suppression of Vertical Vibration in Railway Vehicles by Controlling the Damping Force of Primary and Secondary Suspensions. *Quarterly Report of RTRI*, 49 (1), 7–15. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.49.7>.
 5. Fomin O. V. (2015) Increase of the Freight Wagons Ideality Degree and Prognostication of their Evolution Stages. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (3), 68–76.
 6. Lovska A. A. (2015) Peculiarities of Computer Modeling of Strength of Body Bearing Construction of Gondola Car During Transportation by Ferry-Bridge. *Metallurgical and Mining Industry*, (1), 49–54.
 7. Kelrykh M., Fomin O. (2014) Perspective Directions of Planning Carrying Systems of Gondolas. *Metallurgical and Mining Industry*, (6), 64–67.
 8. Nader M., Sala M., Korzeb J., Kostrzewski A. (2014) Kolejowy Wagon Transportowy Jako Nowatorskie, Innowacyjne Rozwiązanie Konstrukcyjne do Przewozu Naczep Siodłowych i Zestawów Drogowych dla Transportu Intermodalnego. *Logistyka*, (4), 2272–2279 (in Polish).
 9. Divya Priya G., Swarnakumari A. (2014) Modeling and Analysis of Twenty Tonne Heavy Duty Trolley. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 2 (6), 1568–1580.
 10. Krasov W., Niezgoda T. (2014) FE Numerical Tests of Railway Wagon for Intermodal Transport According to PN-EU Standards. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62 (4), 843–851. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2014-0093>.
 11. Myamlin S., Povilas Lingaitis L., Dailydka S., Vaičiūnas G., Bogdevičius M., Bureika G. (2015) Determination of the Dynamic Characteristics of Freight Wagons with Various Bogie. *Transport*, 30 (1), 88–92. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>.
 12. Hauser V., Nozhenko O. S., Kravchenko K. O., Loulová M., Gerlici J., Lack T. (2017) Impact of Wheelset Steering and Wheel Profile Geometry to the Vehicle Behavior when Passing Curved Track. *Manufacturing Technology*, 17 (3), 306–312. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/mt/17/3/306>.
 13. Tartakovskiy E., Gorobchenko O., Antonovych A. (2016) Improving the Process of Driving a Locomotive Through the Use of Decision Support Systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (3), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80198>.
 14. Hauser V., Nozhenko O. S., Kravchenko K. O., Loulová M., Gerlici J. I., Lack T. (2017) Proposal of a Mechanism for Setting Bogie Wheelsets to Radial Position while Riding Along Track Curve. *Manufacturing Technology*, 17 (2), 186–192. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/mt/17/2/186>.
 15. Wright P. (1973) *Polyurethane Elastomers*. Leningrad, Khimiya Publ. 304 (in Russian).
 16. Romanovskii V. P. (1979) *Reference Book on Cold Stamping*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 520 (in Russian).
 17. Aleksandrov K. N., Freidgeim K. I., Alekseenko V. I., Mikhailov V. A. (1977) *Polyurethanes in the Manufacture of Artificial Materials for Clothing and Footwear*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 256 (in Russian).
 18. Akopyan R. A. (1979) *Working Processes and Strength Theory of Air Suspension*. Lviv: Publishing House of Lviv University. 222 (in Russian).
 19. Acherkan N. S. (ed.) (1995) *Mechanical Engineer Handbook. Vol. III*. Moscow, Mashgiz Publ. (in Russian).
 20. *Research and Design Work on the Creation of Air Suspension of Bogie for Diesel Electric Trains with Increased Dynamic and Operational Performance: Research Report (Concluding)* 0108U010504, 2004. 67 (in Russian).
 21. Alyamovskii A. A. (2004) *SolidWorks. Engineering Analysis by Finite Element Method*. Moscow, DMC Press Publ. 432 (in Russian).
 22. Slipchenko I. N., Masliev V. G. (2014) Investigation of the Strength of the Flexible Shell of a Pneumatic Spring for a Diesel Train. *VIII Universitets'ka Naukovo-Praktichna Student'ska Konferentsiya Magistrantiv Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu "Kharkiv'skii Politekhichniy Institut": Materiali Konf., 22–24 Kvitnya 2014 r. Ch. 1*. Kharkiv, Publishing House of National Technical University "Kharkiv Polytechnic University", 219–220 (in Russian).
 23. Dushchenko V. V., Masliev A. O., Masliev V. G. (2017) *Pneumatic Suspension*. Patent 113641 of the Ukraine (in Ukrainian).
 24. Masliev V. G., Dushchenko V. V., Masliev A. O. (2018) Improvement of Passenger Comfort by Means of Application of Improved Pneumatic Suspension in Vehicles. *Vagonnyi Park [Wagon Fleet]*, (1–2), 40–43 (in Ukrainian).

Received: 14.05.2018

Accepted: 06.12.2018

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-310-319>

УДК 621.83.062.1

Экспериментальные характеристики механической бесступенчатой передачи с внутренними силовыми функциями

Канд. техн. наук, доц. А. В. Юркевич¹⁾,
инженеры А. В. Терешин¹⁾, В. А. Солдаткин¹⁾

¹⁾Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук (Екатеринбург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Предлагается для повышения энергоэффективности использования автотранспортного средства, оснащенного поршневым двигателем внутреннего сгорания, в качестве трансмиссии применять новый тип механических бесступенчатых передач с внутренними силовыми функциями. Показано, что если в известном многопоточном импульсном вариаторе В. Ф. Мальцева механизмы свободного хода дополнить упругими валами – торсионами, то такой вариатор превращается в непрерывный трансформатор – механическую бесступенчатую передачу с внутренними силовыми функциями. Появляются внутренняя автоматичность и непрерывность во всем диапазоне изменения передаточного отношения. Это схемное техническое решение реализовано в экспериментальном образце. В ходе испытаний изучены свойства и характеристики такой механической бесступенчатой передачи. Приведены кинематическая схема и основные конструктивные размеры экспериментального образца. Разработаны специальное стендовое оборудование и измерительно-регистрирующая аппаратура. Определен перечень регистрируемых параметров. Статистически оценена точность их измерения. Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей крутящих моментов на ведомом и ведущем валах передачи от частоты вращения ведомого вала. Показано, что характеристики передачи в безразмерном виде – коэффициент трансформации и коэффициент полезного действия – в функции внутреннего передаточного отношения являются универсальными. Установлено, что путем независимого изменения амплитуды колебаний внутренних звеньев (уровня силовой функции) и частоты вращения ведущего вала можно получить бесконечный кинематический и значительный силовой диапазоны передачи. Передача обладает высокими преобразующими и энергетическими свойствами, которые лучше, чем у гидродинамических передач.

Ключевые слова: механическая бесступенчатая передача, механизм свободного хода, амплитуда колебаний, торсионный вал, силовая функция, испытательный стенд, экспериментальная безразмерная характеристика, внутреннее передаточное отношение, коэффициент трансформации, КПД

Для цитирования: Юркевич, А. В. Экспериментальные характеристики механической бесступенчатой передачи с внутренними силовыми функциями / А. В. Юркевич, А. В. Терешин, В. А. Солдаткин // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 310–319. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-310-319>

Experimental Characteristics of Mechanical Continuously Variable Transmission with Internal Force Functions

A. V. Yurkevich¹⁾, A. V. Tereshin¹⁾, V. A. Soldatkin¹⁾

¹⁾Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Engineering Science,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” (Ekaterinburg, Russian Federation)

Abstract. The paper proposes a new type of a mechanical continuously variable transmission with internal force functions to upgrade the energy efficiency of a vehicle equipped with a conventional engine. The prototype of the transmission is a well-known V. F. Maltsev concurrent pulse variator in which freewheel mechanism driven members are supplemented with elastic torsions shafts. It is shown that the variator turns into a continuous transformer – a mechanical continuously variable transmission with internal force functions. There is an internal automaticity and continuity in the entire range of gear ratio changes. The configuration engineering solution is implemented in the engineering prototype. The aim of the research

Адрес для переписки

Юркевич Андрей Владиленович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения РАН
ул. Комсомольская, 34,
620049, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: (343) 374-47-25
ges@imach.uran.ru

Address for correspondence

Yurkevich Andrey V.
Federal State Budgetary Scientific Institution
“Institute of Engineering Science,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”
34, Komsomolskaya str.,
620049, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: (343) 374-47-25
ges@imach.uran.ru

is experimental study of the properties and characteristics of such a mechanical continuously variable transmission. The kinematic configuration and the main structural dimensions of the engineering prototype are given. Special testing facility and measuring-and-recording equipment have been developed. A set of parameters to be recorded has been specified. The accuracy of their measurement is statistically estimated. The results of the experiments are presented in terms of output and input torque dependencies on the speed of the driven shaft. It is shown that the transmission characteristics in their dimensionless form (transformer ratio and efficiency) in the function of internal gear ratio are universal. The possibility of obtaining an infinite kinematic and significant power transmission ranges by independently changing the internal link oscillation range (level of the force function) and the rotation frequency of the drive shaft has been experimentally shown. The transmission has high transforming and energy properties, which are higher than those of hydrodynamic gears.

Keywords: mechanical continuously variable transmission, freewheel mechanism, oscillation range, torsion shaft, force function, testing facility, experimental dimensionless characteristics, internal gear ratio, transformer ratio, efficiency

For citation: Yurkevich A. V., Tereshin A. V., Soldatkin V. A. (2021) Experimental Characteristics of Mechanical Continuously Variable Transmission with Internal Force Functions. *Science and Technique*. 20 (4), 310–319. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-310-319> (in Russian)

Введение

Применение механических бесступенчатых передач с внутренними силовыми функциями [1] в качестве трансмиссии направлено на повышение энергоэффективности использования автотранспортного средства (АТС), оснащенного поршневым двигателем внутреннего сгорания (ДВС) [2]. В настоящее время, несмотря на усилия, затрачиваемые на разработку электромобилей [3–6], вопрос о полном отказе от использования ДВС на АТС пока не стоит. Вариант комбинированной энергетической установки также включает в себя ДВС [7, 8]. Поэтому проблема все еще остается актуальной.

Вопрос энергоэффективности использования ДВС решается, если обеспечить его работу в точках характеристики, соответствующих минимальному эффективному удельному расходу топлива при любом значении требуемой мощности. В [9] показано, что для организации работы ДВС на таких режимах обязательно должна существовать гибкая связь между ДВС и трансмиссией. Такая связь возможна при наличии в трансмиссии бесступенчатой передачи. Поэтому целью использования бесступенчатой передачи в трансмиссии является обеспечение регулирования режимов работы ДВС для осуществления его работы на наиболее выгоднейших режимах [10].

Применение электрических и гидрообъемных трансмиссий [11, 12], фрикционных вариаторов [13–15] или механических автовариаторов [16] в полной мере не решает проблему из-за низкого КПД. Использование гидродинамических передач [17] и инерционных импульсных трансформаторов момента [18] не обеспечивает независимого изменения частоты вращения вала и передаваемого момента,

а именно это должно осуществляться при регулировании.

В [19] доказано, что в механической бесступенчатой передаче момент может передаваться не силами трения, а нормальными силами давления. Статьи [1, 20] посвящены разработке данного типа механических бесступенчатых передач. Ключевыми элементами такой передачи являются новые технические решения:

- в известном многопоточном импульсном вариаторе В. Ф. Мальцева [21] механизмы свободного хода дополнены упругими валами – торсионными, в результате чего такой вариатор превращается в непрерывный трансформатор – механическую бесступенчатую передачу [20];

- использование в передаче экспериментально проверенных новых надежных механизмов свободного хода (МСХ) осевого исполнения с дополнительными рабочими поверхностями [22], у которых по сравнению с известными роликowymi МСХ в десять раз уменьшено отношение внутренних сил, вызывающих контактные напряжения, к полезным, создающим передаваемый момент;

- построение систем автоматического регулирования таких передач, которые путем раздельного независимого регулирования амплитуды колебаний внутренних звеньев передачи и частоты вращения вала ДВС должны обеспечить его загрузку по экономичному режиму при любой потребной по условиям движения мощности [23].

В указанных выше работах представлены результаты теоретических исследований и экспериментальных испытаний МСХ, но отсутствуют данные экспериментального изучения передачи в целом. Задача исследований авторов статьи – восполнить этот пробел.

Объект экспериментального исследования

На рис. 1 приведены кинематическая схема, сборочный чертеж и общий вид изготовленного упрощенного экспериментального образца механической бесступенчатой передачи. Вращение входного вала, состоящего из передней и хвостовой частей (соединены промежуточным валом), с помощью генератора колебаний, выполненного в виде пяти шарнирных пятизвенных механизмов (общий кривошип, шатуны, коромысла), преобразуется в колебательное движение коромысел. Коромысла жестко соединены с ведущими элементами механических выпрямителей. С помощью торсионов через суммирующий редуктор (шестерни 7 и 8) вращение передается на выходной вал. Амплитуда колебаний коромысел определяется радиусом общего кривошипа. Изменение амплитуды осуществляется ступенчато путем поворота поводка относительно входного вала и смещением его на один шлиц относительно наружного зуба шлицевой муфты шестерни 13 с последующим соединением их подвижной муфтой.

За каждый оборот ведущего вала на каждом торсионном валу создается и расходуется по-

тенциальная энергия. Она создается, когда направления упругого момента и угловой скорости противоположны, и расходуется, когда они совпадают. Если выходной вал неподвижен (стоповый режим, передаточное отношение $i = n_2/n_1 = 0$), то выпрямители включены в течение всего цикла. Поэтому за один оборот входного вала потенциальная энергия каждого торсиона возрастает от нуля до максимума и уменьшается до нуля, возвращая входному валу энергию, затраченную на ее создание. Но среднее значение упругого момента равно половине максимального.

Поскольку имеются пять торсионов, работающих со сдвигом по фазе 72° , в любое время есть момент, передаваемый на ведомый вал: $M_2 = 2,5M_{\text{тор}}^{\text{max}}$. Передаточное отношение бесступенчатой передачи при генераторе гармонических колебаний $i = \varphi_0 i_{\text{тр}} [1]$ (где φ_0 – максимальное значение передаточного отношения механизма, преобразующего вращательное движение входного вала в колебательное генератора, для гармонических колебаний оно совпадает с амплитудой колебаний коромысла φ_0 , выраженной в радианах; $i_{\text{тр}}$ – внутреннее передаточное отношение [1]; $i_{\text{р}}$ – передаточное отношение суммирующего редуктора).

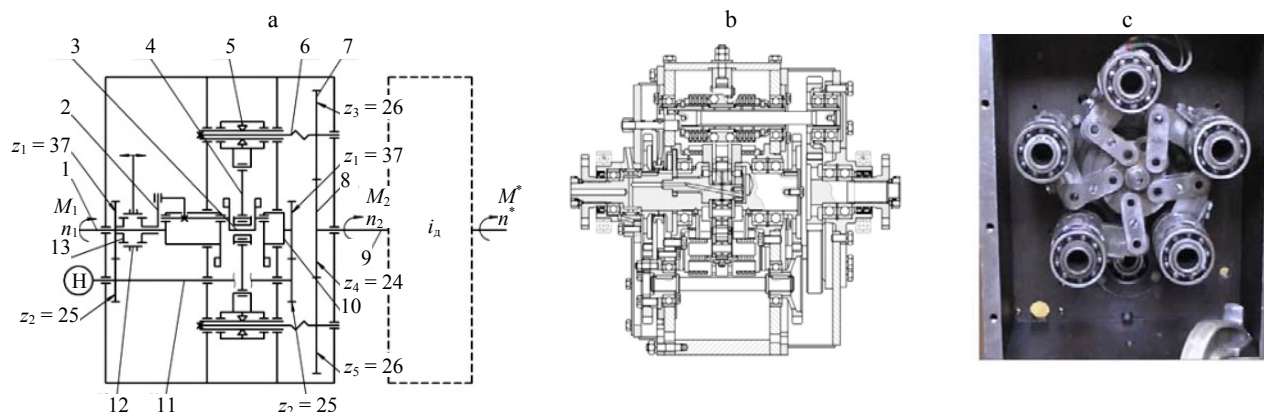


Рис. 1. Экспериментальный образец бесступенчатой передачи: а – кинематическая схема: 1, 10 – передняя и хвостовая части входного вала; 2 – поводок с наружной шлицевой втулкой; 3 – общий кривошип; 4 – шатун; 5 – коромысло; 6 – торсион; 7 – шестерня торсионного вала; 8 – общая шестерня суммирующего редуктора; 9 – выходной вал; 11 – промежуточный вал; 12 – подвижная муфта; 13 – шестерня привода промежуточного вала; Н – шестеренчатый насос системы смазки; M_1, M_2 – момент на входном и выходном валах; n_1, n_2 – частота вращения входного и выходного валов; б – сборочный чертеж; с – вид генератора колебаний экспериментального образца

Fig. 1. Engineering prototype of continuously variable transmission: а – kinematics: 1, 10 – front and tail of input shaft; 2 – driver pin with outer lined sleeve; 3 – crank; 4 – crank rod; 5 – beam; 6 – torsion shaft; 7 – torsion shaft gear; 8 – central ring gear; 9 – output shaft; 11 – countershaft; 12 – sliding dog clutch; 13 – countershaft drive gear; Н – gear oil pump; M_1, M_2 – input and output torques; n_1, n_2 – input and output shaft RPM; б – GA drawing; с – view of engineering prototype generator of vibrations

В изготовленной конструкции амплитуда колебаний изменяется от 0 до $\varphi_0 = 0,3$, $i_p = z_3/z_4 = 26/24 = 1,0833$, и при $i_t = 1$ максимальное передаточное отношение передачи составляет 0,325. Поэтому не может быть $n_1 = n_2$. Для того чтобы получить прямую передачу, необходимо дополнить передачу на выходе еще одним редуктором с передаточным отношением i_d , обеспечивающим $n_2/n_1 = 1 = i_d\varphi_0 i_p$. На рис. 1а пунктиром обозначен дополнительный редуктор с передаточным отношением $i_d = 1/\varphi_0 i_p$. Тогда фиксированное значение $\varphi_0 = 0,3 i_d$ будет численно равным 3,073. При этом на выходном валу дополнительного редуктора крутящий момент $M^* = M_2/i_d$, а частота вращения вала $n^* = n_2 i_d$ (рис. 1а). Такие расчетные процедуры необходимы для сравнения полученных экспериментальных данных с известными характеристиками бесступенчатых передач, имеющих прямую передачу, например с комплексным гидротрансформатором.

Условия и методика проведения экспериментов

Испытания передачи проведены на разработанном стенде [24], кинематическая схема кото-

рого представлена на рис. 2. Измерение и регистрацию параметров осуществляли при помощи модульной измерительно-вычислительной системы [25]. Частота вращения валов n_1 и n_2 регистрировалась с использованием энкодеров EP62 с точностью измерения $\pm(1,54-2,31)$ об/мин [26]. Для измерения моментов M_1 и M_2 использовали тензометрические датчики, передача информации осуществлялась при помощи телеметрических тензоусилителей ТТ01 [27]. Точность измерения моментов составила: $M_1 = \pm 0,219$ Н·м; $M_2 = \pm 2,878$ Н·м [28]. Реактивный момент M_p на корпусе измерялся при помощи S-образного датчика силы с точностью $\pm 3,545$ Н·м. Для смазки элементов передачи использовался масляный насос (рис. 1а). Для достоверной оценки преобразующих свойств передачи необходимо исключить затраты момента M_n на привод насоса. Экспериментальные значения M_n с достаточной точностью были аппроксимированы зависимостью $M_n = -8 \cdot 10^{-7} n_1^2 + 2,43 \cdot 10^{-3} n_1 + 3,94$. Среднеквадратическое отклонение M_n составляет $\sigma = 0,225$ Н·м, при этом доверительный интервал с вероятностью 95 %, установленный с помощью коэффициента Стьюдента $t_{0,05,70} = 1,667$, составляет $\delta = \pm 0,375$ Н·м.

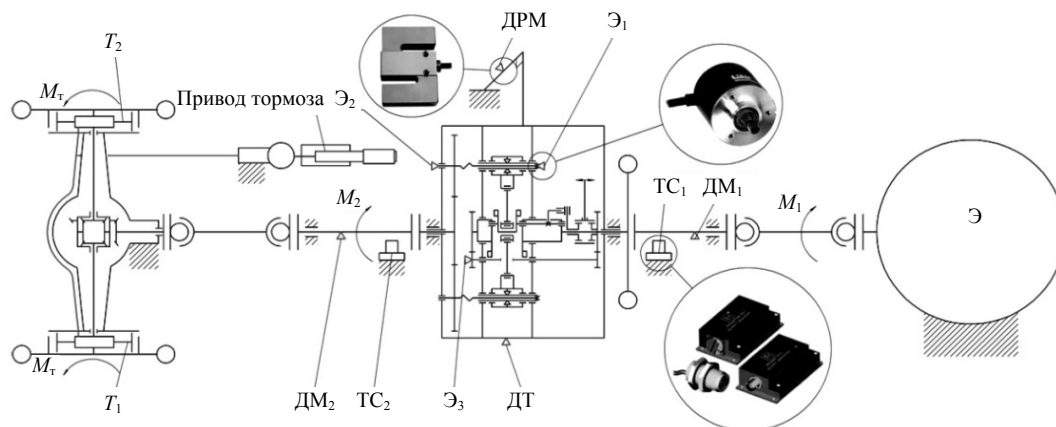


Рис. 2. Кинематическая схема стенда с расположением датчиков: Э – электродвигатель постоянного тока; ДМ₁, ДМ₂ – тензометрический датчик момента на входном и выходном валах; ТС₁, ТС₂ – телеметрический тензоусилитель ТТ01; ДРМ – датчик реактивного момента; ДТ – датчик температуры; Э₁, Э₂, Э₃ – энкодер (датчик угла поворота); Т₁, Т₂ – штатный тормоз моста автомобиля УАЗ; М_т – тормозной момент

Fig. 2. Kinematic scheme of testing facility with arrangement of sensors: Э – DC motor; ДМ₁, ДМ₂ – input and output strain torque sensors; ТС₁, ТС₂ – telemetric strain gauge amplifier ТТ01; ДРМ – torque reaction sensor; ДТ – temperature sensor; Э₁, Э₂, Э₃ – encoder (rotation angle sensor); Т₁, Т₂ – УАЗ (JAZ) axle regular brake; М_т – braking torque

Наличие осевых зазоров в выпрямителях и радиальных зазоров в зацеплениях зубчатых колес передачи [1, 29] отрицательно сказывается на величине угловой скорости выходного звена (реализованная φ_0^* амплитуда колебаний становится меньше геометрически установленной φ_0). Это приводит к тому, что характеристика передачи отличается от теоретической. В данном случае она получается такой же, как при отсутствии зазоров, но при амплитуде φ_0^* , уменьшенной на величину угловых зазоров $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_0^*$ во всей кинематической цепи передачи [1]. При этом скорость выходного вала будет меньше теоретической на величину кинематической потери хода $\Delta n_2 = n_2^T - n_2^3$ (где n_2^T – теоретически возможная частота вращения вала; n_2^3 – реализованная частота вращения вала). Тогда, учитывая, что $n_2^T = \varphi_0 i_{tp} n_1^3$ и $n_2^3 = \varphi_0^* i_{tp} n_1^3$, можно определить $\Delta n_2 = (\varphi_0 - \varphi_0^*) i_{tp} n_1^3 = \Delta\varphi i_{tp} n_1^3$. Отсюда $\Delta\varphi_0$ можно считать кинематической потерей хода, но выраженной в радианах. При отсутствии нагрузки на выходном валу ($M_2 = 0$) внутреннее передаточное отношение $i_t = 1$. Это позволяет вносить коррективы в геометрически устанавливаемую амплитуду колебаний коромысла выпрямителей φ_0 на величину угловых зазоров и определить:

$$\varphi_0^* = n_2^3 / (i_{tp} n_1^3); \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_0 - n_2^3 / (i_{tp} n_1^3). \quad (2)$$

Для передачи при отсутствии нагрузки на ведомом валу ($M_2 = 0$) были выполнены эксперименты. Результаты расчета потерянного хода по (2) изменяются от $5,5^\circ$ до $2,4^\circ$ и зависят от частоты вращения входного вала. С увеличением частоты его вращения величина потерянного хода уменьшается, что, как показано в [29], связано с выборкой зазоров полумуфтами в выпрямителях перед заклиниванием.

Испытания передачи на стенде проводились в такой последовательности. Устанавливались фиксированная амплитуда колебаний φ_0 и частота вращения n_1 . Момент сопротивления на ведомом валу M_2 изменялся ступенчато затяж-

кой ручного тормоза стенда. Торможение осуществлялось до полной остановки колес – стоповый режим ($n_2 = 0$). Устанавливалась другая амплитуда колебаний, и все повторялось при том же значении n_1 . Далее для каждой установленной амплитуды φ_0 выполнялись аналогичные серии экспериментов при других частотах вращения вала n_1 . Частота вращения вала n_1 изменялась ступенчато от 200 до 2400 об/мин. Амплитуда колебаний φ_0 составила 0,069; 0,099; 0,129; 0,139 и 0,172 рад.

Результаты испытаний и их анализ

Результаты серий экспериментов [30] представлены на рис. 3. Экспериментальные точки, получены усреднением за 50–60 циклов значений моментов M_2 и $M_1 = M_1^3 - M_n$, где M_1^3 – экспериментально измеренное значение. Среднее значение относительной погрешности определения M_2 составило 3,6–7,8 %, а M_1 – 2,5–5,3 %. На рис. 3а приведены зависимости M_2 и M_1 при постоянной частоте вращения ведущего вала $n_1 = 1000$ об/мин. Из графиков видны (как это теоретически было показано в [20]) непрерывность и внутренняя автоматичность изменения моментов, присущая такой передаче, получаемая за счет изменения силовых функций, которая сохраняется во всем диапазоне изменения частоты вращения n_2 ведомого вала.

Ступенчатое увеличение амплитуды колебаний коромысел выпрямителей φ_0 однозначно приводит к возрастанию момента M_2 на выходном валу передачи. Если изменять амплитуду плавно, что может быть обеспечено системой управления [23], то получим регулируемую внутреннюю автоматичность. Увеличение амплитуды колебаний приводит к повышению момента M_1 и соответственно мощности, требуемой от приводного двигателя (нижний график). Покажем, используя графики рис. 3а, как это свойство влияет на загрузку ДВС при разгоне АТС. На поле графиков M_2 (верхний график) проведем линию, соответствующую приведенному к ведомому валу передачи постоянному моменту сопротивления $M_c = J_{np}\varepsilon$ (где J_{np} – приведенный к ведомому валу передачи момент инерции АТС; ε – постоянное угловое ускорение ведомого вала).

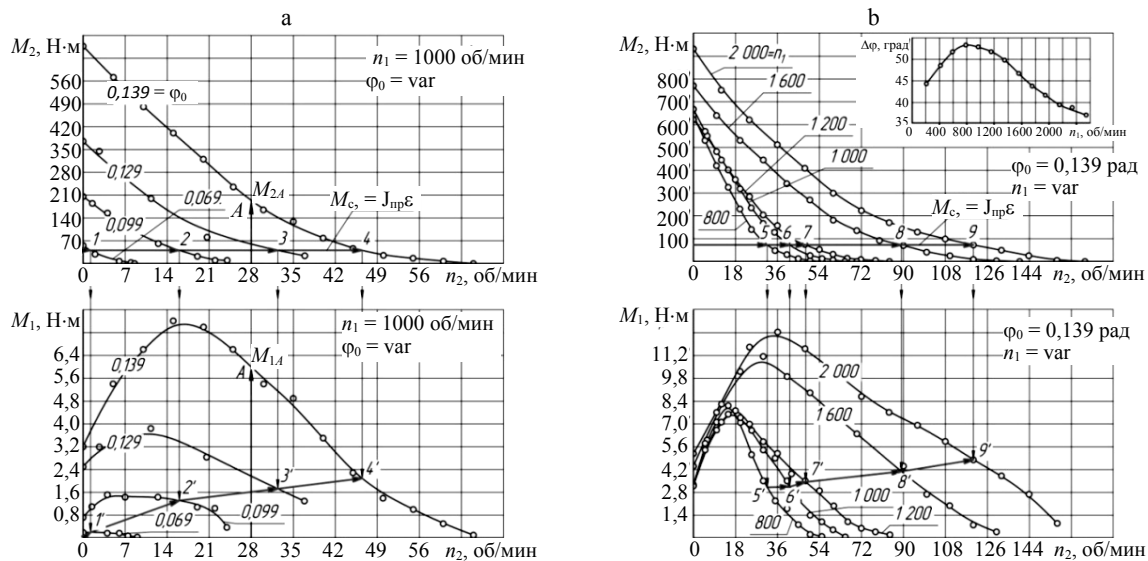


Рис. 3. Результаты экспериментов: а – при постоянной частоте вращения ведущего вала $n_1 = 1000$ об/мин для амплитуд колебаний φ_0 коромысел выпрямителей 0,069, 0,099, 0,129 и 0,139 рад; б – при постоянной амплитуде колебаний коромысла выпрямителей $\varphi_0 = 0,139$ рад для частот вращения n_1 ведущего вала 800, 1000, 1200, 1600 и 2000 об/мин

Fig. 3. Experimental results: а – at constant drive shaft speed $n_1 = 1000$ rpm for rectifier beam oscillation φ_0 amplitudes 0.069, 0.099, 0.129 and 0.139 rad; б – at constant rectifier beam oscillation amplitude $\varphi_0 = 0.139$ rad for the drive shaft n_1 rotation frequency 800, 1000, 1200, 1600 and 2000 rpm

Спроецируем точки пересечения M_c с линиями M_2 (1, 2, 3, 4) на соответствующие этим амплитудам φ_0 графики момента на ведущем валу M_1 (нижний график: 1', 2', 3', 4'). Соединив эти точки, получим, что при увеличении амплитуды колебаний выпрямителей без изменения частоты вращения $n_1 = 1000$ об/мин имеет место увеличение M_1 . Это соответствует увеличению нагрузки на валу ДВС. При этом АТС разгоняется – n_2 увеличивается. Поэтому для ДВС при разгоне требуемое увеличение мощности ($N_d = M_1 n_1$) будет обеспечиваться не за счет изменения частоты вращения коленчатого вала n_1 , а за счет увеличения M_1 вплоть до выхода ДВС на внешнюю характеристику.

На графиках рис. 3б представлены значения моментов M_2 и M_1 при фиксированной амплитуде колебаний коромысла выпрямителей $\varphi_0 = 0,139$ рад, но при различных частотах вращения ведущего вала n_1 . Из графиков видно, что и при таком управлении внутренняя автоматичность и непрерывность тоже сохраняются: M_2 плавно уменьшается при увеличении n_2 . Выполним построения так же, как на левом графике. Из них можно увидеть, что при неизменной амплитуде колебаний φ_0 разгон АТС (n_2 возрастает) также может быть осуществлен (точки 5, 6, 7, 8, 9), но уже за счет

увеличения частоты вращения n_1 вала ДВС. При этом момент M_1 (точки 5', 6', 7', 8', 9') останется практически неизменным. Однако графики при $n_1 = 1600$ и $n_1 = 2000$ об/мин несколько отличаются. Это объясняется тем, что при увеличении оборотов n_1 потеря хода $\Delta\varphi_0$, вызванная выборкой зазоров в выпрямителях (рис. 3б сверху – дополнительный график справа), уменьшается, что соответствует увеличению реализованной амплитуды φ_0^* колебаний коромысел на 1–2°.

Путем отдельного регулирования амплитуды колебаний внутренних звеньев и частоты вращения вала ДВС можно обеспечить любую точку с координатами (M_c , n_c) на поле, ограниченном внешней характеристикой ДВС и осями координат, и таким образом обеспечить загрузку ДВС по любому, в том числе экономичному, режиму.

Характеристики бесступенчатых передач представляют собой набор размерных и наиболее часто применяемых безразмерных зависимостей. Преобразующие свойства передачи оцениваются по коэффициенту трансформации момента

$$K_T = M_2 / M_1^*, \quad (3)$$

где M_1^* – значение момента, требуемого для преодоления сопротивлений в кинематиче-

ских парах и бесступенчатого преобразования энергии в пяти выпрямителях передачи, $M_1^* = M_1 - M_n$ (для оценки только преобразующих свойств необходимо исключить влияние M_n).

Коэффициент полезного действия, характеризующий энергетические свойства передачи:

$$\eta = K_T i. \quad (4)$$

Значение передаточного отношения $i = n_2^3 / n_1^3$.

Расчет погрешности определения η выполнен с использованием методов косвенных измерений. При значениях i_t , близких к 0 и 1, абсолютная погрешность η возросла до $\pm(0,128-0,197)$, а в диапазоне $0,15 < i_t < 0,75$, когда значение M_1 было наибольшим, $\eta = \pm(0,030-0,069)$.

Для примера на рис. 4 приведены зависимости K_T , вычисленные по (3), и η , вычисленные по (4), при фиксированной амплитуде колебаний и различных частотах вращения вала n_1 .

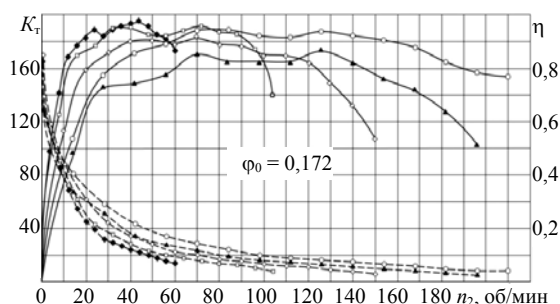


Рис. 4. Зависимость коэффициента трансформации K_T (пунктирная линия) и КПД (сплошная линия) от частоты вращения выходного вала при амплитуде колебаний коромысла $\varphi_0 = 0,172$ рад при частоте вращения входного вала n_1 , об/мин: $\blacklozenge$ – 1000; $\square$ – 1200; $\diamond$ – 1600; $\blacktriangle$ – 2000; $\circ$ – 2200

Fig. 4. Dependence of transformer ratio K_T (dotted line) and efficiency (solid line) on output shaft rotation frequency at rectifier beam oscillation amplitude $\varphi_0 = 0.172$ rad while speed of input shaft n_1 , rpm: $\blacklozenge$ – 1000; $\square$ – 1200; $\diamond$ – 1600; $\blacktriangle$ – 2000; $\circ$ – 2200

Полученные зависимости нельзя сравнить с известными данными бесступенчатых передач, у которых передаточное отношение изменяется от 0 до 1. Для того чтобы их сравнить с характеристикой, например, гидротрансформатора, выполним масштабирование с использованием (с точностью до его КПД) дополнительного редуктора ($K_T^* = M^* / M_1^* = M_2 / M_1^* i_d = K_T / i_d$ и $i^* = n^* / n_1 = n_2 i_d / n_1 = i \cdot i_d$) и представ-

вим в безразмерном виде $\eta(i^*) = K_T^* i^*$ (рис. 5). На этом же рисунке для сравнения представлена характеристика гидротрансформатора автомобиля М-21 [31]. Передаточное отношение дополнительного редуктора i_d определялось с учетом амплитуды колебаний коромысла $\varphi_0^* = 0,1$ рад, $i_d = 1 / (\varphi_0^* i_p) = 9,231$. Сейчас

передаточное отношение i^* изменяется от 0 до 1, как и у гидротрансформатора. Из рис. 5 видно, что для механической бесступенчатой передачи характеристики существенно лучше, чем для гидротрансформатора.

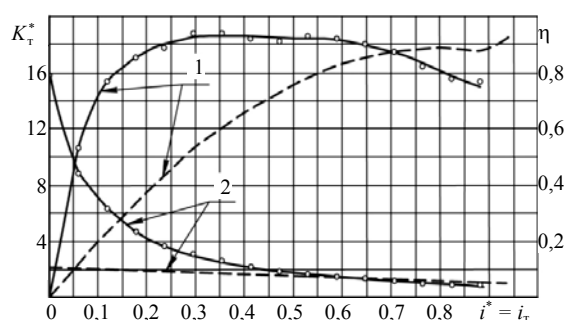


Рис. 5. Безразмерные характеристики бесступенчатых передач: 1 – значения КПД; 2 – коэффициент трансформации; сплошная линия – механическая бесступенчатая передача с внутренней силовой функцией при $\varphi_0^* = 0,1$ и $n_1 = 2200$ об/мин; пунктирная линия – гидротрансформатор автомобиля М-21 (данные [31], $\circ$ – экспериментальные точки)

Fig. 5. Dimensionless characteristics of continuously variable transmissions: 1 – efficiency values; 2 – transformer ratio; solid line – mechanical continuously variable transmission with internal force function at $\varphi_0^* = 0.1$ and $n_1 = 2200$ rpm; dotted line – model M-21 car hydraulic torque converter (data [31], $\circ$ – experimental points)

Если параметры передачи φ_0 и i_p определяются конструктивно и не зависят от передаваемого момента, то внутреннее передаточное отношение i_t характеризует преобразующие свойства передачи и изменяется только от 0 до 1 в зависимости от угла закрутки упругого элемента – торсиона, что однозначно определяет силовую функцию и передаваемый момент. Поэтому если при построении характеристики $\eta(i^*)$ (рис. 5) в качестве аргумента принять внутреннее передаточное отношение i_t передачи, то характеристика не будет зависеть от i_p и φ_0 , т. е. будет обладать универсальностью. При этом масштабированная функция $\eta(i^*)$ совпадает с функцией $\eta(i_t)$, зависящей толь-

ко от i_T . Снова запишем выражение для КПД: $\eta(i^*) = K_T^* i^*$. С учетом того, что $i = i_{\text{д}} = \varphi_0 i_{\text{р}} i_{\text{д}}$ и $i_{\text{д}} = 1/\varphi_0 i_{\text{р}}$, получим, что $i^* = i_T$. Тогда $\eta(i^*) = K_T^* i_T = \eta(i_T)$, и с учетом $K_T^* = K_T/i_{\text{д}}$ получим

$$K_T/i_{\text{д}} = \eta(i_T)/i_T. \quad (5)$$

Зависимость $\eta(i^*) = \eta(i_T)$, представленная на рис. 5, получена при фиксированных амплитуде $\varphi_0 = 0,172$ рад и частоте вращения ведущего вала $n_1 = 2200$ об/мин, но она может использоваться для определения коэффициента трансформации при любых других амплитудах колебаний φ_0 и частотах вращения ведущего вала n_1 , а также для конструкции передачи с другим передаточным отношением суммирующего редуктора. Поэтому выражение (5) имеет универсальный фундаментальный характер. Покажем это на примере определения коэффициента трансформации K_T для $\varphi_0 = 0,139$ при $n_1 = 1000$ об/мин, с одной стороны, расчетным способом с использованием полученного выражения (5) и экспериментальной функции $\eta(i_T)$, представленной на рис. 5, и с другой стороны – напрямую – с помощью экспериментальных графиков, приведенных на рис. 3а. Выберем на графиках произвольно точку А (показана стрелками) при $n_2 = 28$ об/мин, моменты на валах: $M_{2A} = 200$ Н·м; $M_{1A} = 6$ Н·м. Экспериментальный коэффициент трансформации $K_T^3 = M_{2A}/M_{1A} = 200/6 = 33,33$. При этом значение $i_T = n_2/(\varphi_0^* i_{\text{р}} n_1) = 28/((0,139 - 0,0908) \cdot 1,0833 \times 1000) = 0,536$, где $\varphi_0^* = 0,139 - \Delta\varphi_0 = 0,0482$, $\Delta\varphi_0 = 5,2^\circ \cdot \pi/180 = 0,0908$ – значение потерь амплитуды колебаний, взято из графика на рис. 3б сверху справа при $n_1 = 1000$ об/мин. Требуемое передаточное отношение дополнительного редуктора, обеспечивающее прямую передачу $i_{\text{д}} = 1/\varphi_0^* i_{\text{р}} = 1/0,0482 \cdot 1,0833 = 19,15$. С помощью функции $\eta(i_T)$, представленной на рис. 5, при $i_T = 0,536$ получим значение $\eta(0,536) = 0,92$. Из выражения (5) получим расчетное значение коэффициента трансформации $K_T^{\text{р}} = \eta(i_T) i_{\text{д}} / i_T = 0,92 \cdot 19,15/0,536 = 32,89$. Разница между K_T^3 и $K_T^{\text{р}}$ не более 2 %.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные характеристики передачи позволяют подтвердить ранее теоретически доказанные высокие преобразующие и энергетические свойства механической бесступенчатой передачи с колебательным движением внутренних звеньев и регулируемые силовыми функциями, которые лучше, чем у гидродинамических передач.

2. Оснащенное такой трансмиссией автотранспортное средство будет обладать рядом важных преимуществ:

- на начальном этапе разгона автотранспортного средства двигатель внутреннего сгорания разгружается, хотя на ведомом валу передачи действует большой крутящий момент;

- разгон автотранспортного средства можно производить при постоянной и достаточно малой частоте вращения вала двигателя;

- возможность независимого регулирования частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания и амплитуды колебаний (уровня силовой функции) позволяет получить нагрузочную характеристику двигателя внутреннего сгорания, соответствующую минимальному удельному расходу топлива.

Работа выполнена по госбюджетной теме № 0391-2014-0007.

ЛИТЕРАТУРА

1. Благонравов, А. А. Механические бесступенчатые передачи / А. А. Благонравов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 202 с.
2. Благонравов, А. А. Повышение энергоэффективности транспортных машин при использовании механических бесступенчатых передач с регулируемыми силовыми функциями / А. А. Благонравов, А. В. Юркевич // Журнал автомобильных инженеров. 2017. Т. 103, № 2. С. 18–21.
3. Hailemariam, N. H. Design and Development of Power Transmission System for Green and Light Weight Vehicles: a Review / N. H. Hailemariam, T. D. Redda // The Open Mechanical Engineering Journal. 2018. Vol. 12, No 1. P. 81–94. <https://doi.org/10.2174/1874155X01812010081>.
4. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design / M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi. CRCpress, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781420054002/>.
5. Экономика современных и перспективных конструкций автомобилей в их полном жизненном цикле / В. К. Азаров [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. 2013. Т. 78, № 1. С. 46–48.
6. Сушкевич, П. П. Трансформация мировой автомобильной промышленности / П. П. Сушкевич // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 432–439. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-432-439>.

7. Куликов, И. А. Сравнительное исследование энергетической эффективности комбинированных энергоустановок, предназначенных для транспортных средств / И. А. Куликов, Л. Ю. Лежнев, С. В. Бахмутов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 1. С. 15–25. <https://doi.org/10.1134/S0235711919010103>.
8. Куликов, И. А. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств / И. А. Куликов, В. В. Селифонов, А. И. Филонов // Известия МГТУ МАМИ. 2010. Т. 10, № 2. С. 44–51.
9. Кузнецов, А. Г. Анализ возможности работы двигателя с минимальным расходом топлива / А. Г. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. Т. 664, № 7. С. 52–58.
10. Петров, В. А. Автоматическое управление бесступенчатых передач самоходных машин / В. А. Петров. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
11. Павловская, О. О. Формирование идеальной тяговой характеристики колесной машины и экономической характеристики двигателя внутреннего сгорания регулированием электромеханической трансмиссии / О. О. Павловская, С. В. Кондаков, Л. С. Носенко // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 3, № 2. С. 64–73.
12. Бахмутов, С. В. Исследование возможностей оптимизации объемной гидropередачи по показателям динамики разгона и топливной экономичности / С. В. Бахмутов, Д. Н. Гусаков // Известия МГТУ МАМИ. 2007. Т. 4, № 2. С. 11–14.
13. Modeling, Kinematics and Traction Performance of No-Spin Mechanism Based on Roller-Disk Type of Traction Drive Continuously Variable Transmission / C. Li [et al.] // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 133. P. 278–294. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.017>.
14. Bertini, L. Analytical Model for the Power Losses in Rubber V-Belt Continuously Variable Transmission (CVT) / L. Bertini, L. Carmignani, F. Frendo // Mechanism and Machine Theory. 2014. Vol. 78. P. 289–306. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.016>.
15. Design and Analysis of a Novel Wheel Type Continuously Variable Transmission / X. Chen [et al.] // Mechanism and Machine Theory. 2017. Vol. 107. P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.012>.
16. Гулия, Н. В. Адаптивный вариатор и его возможности. Результаты экспериментальной проверки / Н. В. Гулия, С. А. Юрков // Автомобильная промышленность. 2002. № 3. С. 17–20.
17. Гируцкий, О. И. Создание электронных систем управления и диагностирования гидромеханических передач мобильных машин: этапы, пути и перспективы / О. И. Гируцкий, В. П. Тарасик // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 4. С. 18–23.
18. Леонов, А. И. Механические бесступенчатые нефрикционные передачи непрерывного действия / А. И. Леонов, А. Ф. Дубровский. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
19. Благовраов, А. А. Механические бесступенчатые передачи нефрикционного типа / А. А. Благовраов. М.: Машиностроение, 1977. 143 с.
20. Благовраов, А. А. Регулируемая внутренняя автоматичность механического бесступенчатого трансформатора / А. А. Благовраов, А. В. Юркевич, А. В. Терешин // Вестник машиностроения. 2014. № 2. С. 3–7.
21. Мальцев, В. Ф. Механические импульсные передачи / В. Ф. Мальцев. М.: Машиностроение, 1978. 367 с.
22. Энергетические характеристики механического выпрямителя бесступенчатых передач с регулируемой внутренней автоматичностью / А. А. Благовраов [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. 2015. Т. 93, № 4. С. 26–31.
23. Blagonravov, A. A. Automatic Control of a Stepless Mechanical Transmission with an Internal Force Function / A. A. Blagonravov, A. V. Yurkevich, A. A. Yurkevich // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, No 3. P. 185–188. <https://doi.org/10.3103/s1068798x17030054>.
24. Косов, В. П. Стенд для экспериментальных исследований механического бесступенчатого трансформатора момента / В. П. Косов, А. В. Терешин // Символ науки. 2015. Ч. 1, № 9. С. 74–76.
25. Yurkevich, A. V. Modular Measuring and Computing System Performance / A. V. Yurkevich, A. V. Tereshin, V. A. Soldatkin // Инновационная наука. 2015. Ч. 1, № 10. С. 41–44.
26. Солдаткин, В. А. Методика экспериментального определения частоты вращения валов механического бесступенчатого трансформатора момента / В. А. Солдаткин, А. В. Терешин, И. А. Юркевич // Инновационная наука. 2016. Ч. 2, № 10. С. 114–116.
27. Тензоусилитель телеметрический ТТ01: руководство по эксплуатации. Минск, 2014. 15 с.
28. Солдаткин, В. А. Оценка погрешности передачи результатов измерений тензоусилителя телеметрического ТТ01 / В. А. Солдаткин // Инновационная наука. 2015. Ч. 2, № 11. С. 120–121.
29. Ревняков, Е. Н. Уточнение расчета внешней характеристики механической бесступенчатой передачи / Е. Н. Ревняков, А. А. Воронцов, М. В. Вязников // Вестник машиностроения. 2007. № 10. С. 9–12.
30. Экспериментальное исследование нагруженности основных элементов механического бесступенчатого трансформатора момента, обоснование выбора диапазона изменения внутренней силовой функции: отчет о НИОКТР (заключ.); рук. А. А. Благовраов, исп. А. В. Юркевич [и др.]. Курган, 2016. 156 с. № РН 01201368139. ИКРБС АААА-Б16-216032150071-4.
31. Проектирование трансмиссий автомобилей: справочник / под общ. ред. А. И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

Поступила 15.12.2020

Подписана в печать 17.02.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Blagonravov A. A. (2005) *Mechanical Continuously Variable Transmissions*. Ekaterinburg, Publishing House of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 202 (in Russian).
2. Blagonravov A. A., Yurkevich A. V. (2017) Improving the Energy Efficiency of Transport Vehicles Using Mechanical Continuously Variable Transmissions with Variable Power Functions. *Zhurnal Avtomobilnykh Inzhenerov* = *Zurnal AAI*, 103 (2), 18–21 (in Russian).
3. Hailemariam N. H., Redda T. D. (2018) Design and Development of Power Transmission System for Green and Light Weight Vehicles: a Review. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 12 (1), 81–94. <https://doi.org/10.2174/1874155X01812010081>.
4. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. (2017) *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals*,

- Theory and Design*. CRCpress. <https://doi.org/10.1201/9781420054002>.
5. Azarov V. K., Kozlov A. V., Kutenev V. F., Terenchenko A. S. (2013) Economics of Modern and Advanced Car Designs in their Full Life Cycle. *Zhurnal Avtomobilnykh Inzhenerov = Zurnal AAI*, 78 (1), 46–48 (in Russian).
 6. Sushkevich P. P. (2018) Transformation of the Global Automotive Industry. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (5), 432–439. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-432-439> (in Russian).
 7. Kulikov I. A., Lezhnev L. Yu., Bakhmutov S. V. (2019) Comparative Study of the Energy Efficiency of Combined Power Plants Intended for Vehicles. *Problemy Mashinostroeniya i Nadiozhnosty Mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability], (1), 15–25. <https://doi.org/10.1134/S0235711919010103> (in Russian).
 8. Kulikov I. A., Selifonov V. V., Filonov A. I. (2010) Search for Optimal Control of a Hybrid Power Plant of a Car According to the Criterion of Balance of its Ecological and Fuel-Economic Properties. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of Moscow State Technical University], 10 (2), 44–51 (in Russian).
 9. Kuznetsov A. G. (2015) Analysis of the Possibility of Engine Operation with Minimum Fuel Consumption. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 664 (7), 52–58 (in Russian).
 10. Petrov V. A. (1986) *Automatic Control of Continuously Variable Transmissions of Self-Propelled Machines*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 248 (in Russian).
 11. Pavlovskaya O. O., Kondakov S. V., Nosenko L. S. (2013) Formation of an Ideal Traction Characteristic of a Wheeled Vehicle and an Economic Characteristic of an Internal Combustion Engine by Regulating an Electromechanical Transmission. *Vestnik YuUrGU Seriya "Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika" = Bulletin of the South Ural State University, Series "Computer Technologies, Control, Radioelectronics"*, 3 (2), 64–73 (in Russian).
 12. Bakhmutov S. V., Gusakov D. N. (2007) Investigation of the Possibilities of Optimizing Volumetric Hydraulic Transmission in Terms of Acceleration Dynamics and Fuel Efficiency. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of Moscow State Technical University], 4 (2), 11–14 (in Russian).
 13. Li C., Li H., Li Q., Zhang S., Yao J. (2019) Modeling, Kinematics and Traction Performance of No-Spin Mechanism Based on Roller-Disk Type of Traction Drive Continuously Variable Transmission. *Mechanism and Machine Theory*, 133, 278–294. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.017>.
 14. Bertini L., Carmignani L., Frendo F. (2014) Analytical Model for the Power Losses in Rubber V-Belt Continuously Variable Transmission (CVT). *Mechanism and Machine Theory*, 78, 289–306. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.016>.
 15. Chen X., Hang H., Wang W., Li Y. (2017) Design and Analysis of a Novel Wheel Type Continuously Variable Transmission. *Mechanism and Machine Theory*, 107, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.012>.
 16. Gulia N. V., Yurkov S. A. (2002) Adaptive Variator and its Capabilities. Experimental Test Results. *Avtomobilnaya Promyshlennost* [Automotive Industry], (3), 17–20 (in Russian).
 17. Girutsky O. I., Tarasik V. P. (2013) Creation of Electronic Control Systems and Diagnostics of Hydro-Mechanical Transmissions of Mobile Machines: Stages, Ways and Prospects. *Zhurnal Avtomobilnykh Inzhenerov = Zurnal AAI*, (4), 18–23 (in Russian).
 18. Leonov A. I., Dubrovskii A. F. (1984) *Continuous Mechanical Stepless Non-Friction Transmissions*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 192 (in Russian).
 19. Blagonravov A. A. (1977) *Mechanical Stepless Transmissions of Non-Friction Type*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 143 (in Russian).
 20. Blagonravov A. A., Yurkevich A. V., Tereshin A. V. (2014) Adjustable Internal Automaticity of Mechanical Continuously Variable Transformer. *Vestnik Mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (2), 3–7 (in Russian).
 21. Maltsev V. F. (1978) *Mechanical Impulse Transmissions*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 367 (in Russian).
 22. Blagonravov A. A., Yurkevich A. A., Yurkevich A. V., Tereshin A. V., Soldatkin V. A. (2015) Energy Characteristics of a Mechanical Rectifier of Continuously Variable Transmissions with Adjustable Internal Automaticity. *Zhurnal Avtomobilnykh Inzhenerov = Zurnal AAI*, 93 (4), 26–31 (in Russian).
 23. Blagonravov A. A., Yurkevich A. V., Yurkevich A. A. (2017) Automatic Control of a Stepless Mechanical Transmission with an Internal Force Function. *Russian Engineering Research*, 37 (3), 185–188. <https://doi.org/10.3103/s1068798x17030054>.
 24. Kosov V. P., Tereshin A. V. (2015) Test Bench for Experimental Research of a Mechanical Stepless Torque Transformer. *Simvol Nauki* [Science Symbol], 1 (9), 74–76 (in Russian).
 25. Yurkevich A. V., Tereshin A. V., Soldatkin V. A. (2015) Modular Measuring and Computing System Performance. *Innovatsionnaya Nauka* [Innovative Science], 1 (10), 41–44.
 26. Soldatkin V. A., Tereshin A. V., Yurkevich I. A. (2016) Technique for Experimental Determination of Rotation Frequency for Shafts of Mechanical Stepless Torque Transformer. *Innovatsionnaya Nauka* [Innovative Science], 2 (10), 114–116 (in Russian).
 27. *Telemetric Strain-Gauge Amplifier TT01: Operational Manual*. Minsk, 2014. 15 (in Russian).
 28. Soldatkin V. A. (2015) Estimation of Transmission Error of Measurement Results for Telemetric Strain Gauge TT01. *Innovatsionnaya Nauka* [Innovative Science], 2 (11), 120–121 (in Russian).
 29. Revnyakov E. N., Vorontsov A. A., Vyaznikov M. V. (2007) Calculation Refinement of External Characteristics for Mechanical Continuously Variable Transmission. *Vestnik Mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (10), 9–12 (in Russian).
 30. Yurkevich A. V., Blagonravov A. A. [et al.] (2016) *Experimental Study on Loading of Main Elements in Mechanical Stepless Torque Transformer, Substantiation of Choice for Range of Changes in the Internal Power Function: Report on Research and Technological Development* (final). No PH 01201368139. ИКРБС АААА-Б16-216032150071-4. Kurgan. 156 (in Russian).
 31. Grishkevich A. I. (1984) *Design of Car Transmissions*. Moscow, Mashinostroenie. 272 (in Russian).

Received: 15.12.2020

Accepted: 17.02.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328>

УДК 666.972.524

Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежесутоложенным бетоном

Докт. техн. наук, проф. В. В. Молодин¹⁾, А. Е. Ануфриева¹⁾,
докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович²⁾

¹⁾Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)
(Новосибирск, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В процессе эксплуатации бетонные и железобетонные конструкции подвержены воздействию агрессивной среды углекислого газа. При реконструкции и капитальном ремонте причальных сооружений прибрежной зоны морей Дальнего Востока установлена слабая прочность сцепления «старого» карбонизированного и «нового» ремонтного бетонов. Причиной, препятствующей надежному сцеплению бетонов, является образование непрочных продуктов коррозии в порах и на поверхности «старого» бетона. В процессе исследования выполнены ускоренные испытания карбонизации бетона от воздействия углекислого газа. Структура карбонизированного цементного камня исследована с помощью электронного сканирующего микроскопа. Результаты исследований позволили оценить структуры «здорового» и пораженного карбонизацией цементных камней. Выполненный анализ процесса карбонизации бетона, включая микрофотографии образцов, показал, что под действием углекислоты поверхностный слой толщиной 4 мм и более претерпевает перестройку структуры. Волокнистые образования разрушаются, и карбонизированный объем представляет собой груду слабосвязанных рыхлых новообразований и пленок, перекрывающих входы в капиллярную систему бетона. Они не являются надежной основой для сцепления «нового» и «старого» бетонов и препятствуют проникновению жидкости, содержащей продукты растворения цемента из «нового» бетона в капилляры здоровой структуры «старого» для их надежного соединения.

Ключевые слова: углекислый газ, адгезия, прочность, коррозия, железобетон, гидротехнические сооружения, деструкция, структура цементного камня

Для цитирования: Молодин, В. В. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежесутоложенным бетоном / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328>

Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete

V. V. Molodin¹⁾, A. E. Anufrieva¹⁾, S. N. Leonovich²⁾

¹⁾Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN)
(Novosibirsk, Russian Federation),

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

Abstract. During operation, concrete and reinforced concrete structures are exposed to the aggressive environment of carbon dioxide. During the reconstruction and overhaul of the berthing facilities in the coastal zone of the seas of the Far East, a weak bond strength of the “old” carbonated and “new” repair concrete has been established in the paper. The reason that prevents

Адрес для переписки

Молодин Владимир Викторович
Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
ул. Ленинградская, 113,
630008, г. Новосибирск, Российская Федерация
Тел.: +7 913 916-03-00
molodin@sibstrin.ru

Address for correspondence

Molodin Vladimir V.
Novosibirsk State University
of Architecture and Civil Engineering
113, Leningradskaya str.,
630008, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 916-03-00
molodin@sibstrin.ru

reliable adhesion of concrete is the formation of fragile corrosion products in the pores and on the surface of “old” concrete. Accelerated tests of concrete carbonization from exposure to carbon dioxide have been carried out in the course of the study. The structure of the carbonized cement stone has been examined using a scanning electron microscope. The research results have made it possible to assess the structure of a “healthy” cement stone and affected by carbonization. The performed analysis of concrete carbonization process, including micrographs of the samples, has shown that under the action of carbon dioxide, the surface layer with a thickness of 4 mm and more undergoes structural restructuring. Fibrous formations are destroyed, and the carbonized volume is a heap of loosely bound loose new formations and films blocking the entrances to the capillary system of concrete. They are not a reliable basis for adhesion of “new” and “old” concrete and prevent the penetration of liquid containing cement dissolution products from “new” concrete into the capillaries of the healthy structure of the “old” concrete for their reliable connection.

Keywords: carbon dioxide, adhesion, strength, corrosion, reinforced concrete, hydraulic structures, destruction, structure of cement stone

For citation: Molodin V. V., Anufrieva A. E., Leonovich S. N. (2021) Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete. *Science and Technique*. 20 (4), 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328> (in Russian)

Введение

Бетон и железобетон – самые широко распространенные материалы в строительстве. Одним из основных факторов, определяющих их широкое применение, наряду с высокой прочностью, универсальностью и возможностью использования местных материалов, является стойкость к агрессивным воздействиям. Поэтому диапазон применения данных материалов необычайно широк – от возведения высотных зданий до устройства портовых сооружений. В приморских районах степень агрессивности воздушной среды увеличивает содержащийся в ней аэрозоль солей морской воды [1]. К воздействию содержащейся в воздухе углекислоты, вызывающей карбонизацию, добавляется хлоридная агрессия, которые, действуя совместно, ускоряют процесс деградации бетона [2].

Проникновение углекислого газа и ионов хлора в железобетонные конструкции стимулирует коррозию арматуры. Карбонизация бетона – коррозия под действием углекислоты – является одним из основных факторов его разрушения, и на нее следует обратить особое внимание.

Агрессивное действие распространенных углекислых газов CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя бетона. Проникая через поры и капилляры в глубь бетона, углекислый газ,

преодолев защитный слой, достигает арматуры. При накоплении CO_2 в количестве, превышающем критическое, наступает переход стали из пассивного состояния в активное. Слой оксида железа, который защищает арматуру от коррозии, разрушается, и начинается коррозия. Объем продуктов коррозии арматуры значительно превышает объем корродирующего металла. Это вызывает повышенное давление на защитный слой со стороны арматуры. Вдоль арматуры возникают трещины, что впоследствии приводит к отслаиванию защитного слоя бетона [3], к ничем не сдерживаемой коррозии арматуры и разрушению сооружения.

Результаты натурных обследований портовых сооружений на Дальнем Востоке [4, 5] свидетельствуют о постоянном росте количества объектов, требующих ремонта или реконструкции. Это обусловлено приближением сроков эксплуатации к нормативным значениям для большей части сооружений, построенных в 50–60-е гг. прошлого века. Установлено, что глубина проникновения углекислого газа в бетон за 100 лет достигает 90 мм.

Практика восстановления работоспособности конструкций, разрушенных коррозией бетона, предусматривает стандартные способы:

- заделку трещин путем инъектирования в них цементной смеси под давлением до 2 МПа;
- торкретирование с предварительной очисткой поверхности бетона и арматуры от продуктов коррозии, например пескоструйной обработкой;
- обетонирование конструкций с предварительной очисткой поверхностей и устройством дополнительного арматурного каркаса [6].

Эффективность ремонта напрямую зависит от прочности материала восстановления и его сцепления с ремонтируемой конструкцией. Если первое при надлежащих условиях твердения вопросов не вызывает, то обеспечить качество сцепления «старого» (особенно пораженного коррозией) бетона с «новым» совсем не просто. Опыт восстановления портовых сооружений Дальнего Востока показывает, что после восстановления защитного слоя арматуры во многих случаях по плоскости контакта бетона конструкции и бетона восстановления наблюдается появление трещин, заполненных водой.

Сцепление «старого» и «нового» бетонов обеспечивается адгезионным склеиванием материалов по поверхности контакта и за счет проникновения кристаллических сростков из «нового» бетона в поры и капилляры «старого». Причем второй фактор для некорродированной поверхности существенно влияет на сцепление [7]. В условиях, когда «старый» бетон долгое время находился в агрессивной среде, на его поверхности и поверхностях пор и капилляров формируется слой непрочных продуктов коррозии цементного камня, который будет оказывать негативное влияние на сцепление.

Структурообразование и состав цементного камня

Физико-химические процессы твердения цементно-водной системы приводят к образованию прочного конгломерата – цементного камня сложного химического состава и строения. Цементный камень является основным компонентом бетона, определяющим его свойства и долговечность. Долговечность определяется соотношением степени агрессивности воздействий на бетон и стойкостью бетона к агрессивным воздействиям [1, 8].

В портландцементе основную роль при твердении играют силикаты кальция, образующие при соединении с водой гидросиликаты и гидроксид кальция. Процесс структурообразования в портландцементе в ранние сроки до приобретения тестом жесткости характеризуется двумя этапами. На первом количество продуктов гидратации невелико. Незначитель-

ное количество гидросульфоалюминатов кальция типа этtringита, гипса и гексагональных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не в состоянии создать прочную структуру. В этот период возникают коагуляционные связи между отдельными частицами твердеющей системы. В дальнейшем наблюдается резкий рост пластической прочности. С помощью электронно-микроскопических исследований образцов цемента установлено, что упрочнение структуры происходит благодаря усиленному образованию кристаллов этtringита призматической формы и игольчатых гидросиликатов кальция [9]. Гидросиликаты кальция выделяются в форме устойчивого геля.

Для стойкости цементного камня к коррозионным воздействиям очень важны его фазовый состав и вид новообразований, возникающих при гидратации цемента. Также имеют значение кристаллические формы и размер первичных частиц минералов, составляющих цементный камень.

Диффузия углекислого газа в бетон

Начало изучению процессов газовой коррозии бетона и железобетона положено работами В. И. Москвина, Ф. М. Иванова, С. А. Алексеева, Н. Н. Розенталя [1, 10, 11]. Карбонизация бетона и цементного камня зависит от ряда факторов: технологических (состав бетона, В/Ц, вид и содержание вяжущего, заполнители, добавки, плотность и проницаемость защитного слоя, его поровая структура, условия твердения); условий эксплуатации (агрессивность среды, содержание CO_2 , влажность, солнечная радиация, наличие трещин, температура, направление ветра, давление).

Капиллярно-пористая структура цементного камня в бетоне – его высокоразвитая внутренняя поверхность, в значительной степени определяет интенсивность взаимодействия между внешней средой и бетоном. Коррозионные процессы начинаются на поверхности раздела внешней среды и бетона и развиваются в глубине материала – в порах и капиллярах.

Пористая структура цементного камня бетона обуславливает его способность пропускать газы под действием различных градиентов.

Происходит диффузионный перенос агрессивных компонентов через бетон, содержащихся в газообразной внешней среде, под действием разности концентрации этих компонентов [1].

Действие на бетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Агрессивное действие углекислого газа CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя бетона [3].

Определяющим фактором скорости коррозионных процессов в бетоне является скорость внутренней диффузии. При взаимодействии агрессивного вещества с минералами гидратированного цементного камня или выделяются продукты реакции в твердой фазе, или цементный камень перерождается в конгломерат нерастворимых соединений, поэтому кинетика такого перерождения будет зависеть также от того, в каком виде будут выделяться новообразования: рыхлых осадков или плотных пленок, создающих нарастающее сопротивление диффузии в поверхностном слое твердой фазы в порах [1].

Насыщение углекислотой в бетоне происходит, когда CO_2 в воздухе распространяется через открытые поры бетона, растворяется в воде, находящейся внутри капиллярной поры, и реагирует с растворенным гидроксидом кальция. В результате реакции взаимодействия гидроксида кальция с находящимся в воздухе углекислым газом образуется карбонат кальция

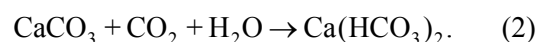


Это приводит к осаждению кристаллов карбоната кальция и выделению воды. Карбонат кальция практически не растворяется в воде, образуя на поверхности бетона пленку [12]. Образовавшийся малорастворимый слой карбоната кальция стремится герметически закрыть поры на поверхности бетона [6].

При карбонизации гидроксида кальция объемом образующего карбоната кальция примерно

на 12 % превышает объем исходного гидроксида кальция. Этот уплотненный карбонатный слой затрудняет развитие обменных реакций [1].

Дальнейшее развитие коррозии происходит за счет реакции карбоната кальция с агрессивной углекислотой. Это приводит к растворению осадка с образованием растворимого бикарбоната, который, вымываясь из бетона, увеличивает объем пор и снижает прочность бетона



Проведенный анализ первоисточников показал, что деструкции бетона в настоящее время посвящено большое количество трудов Е. Е. Шалого, Л. В. Кима, А. В. Степановой, Н. К. Розенталя, В. В. Яковлева и др. [3–5, 11, 13]. Современные работы направлены на математическое моделирование процессов коррозии бетона, методы прогнозирования коррозии бетона, на определение оптимальных областей применения различных бетонов с учетом агрессивности среды, точное назначение мер защиты.

В процессе исследования найдена полезная модель [14], являющаяся прототипом установки для определения кинетики карбонизации бетона Н. К. Розенталя и П. В. Язева [15], оснащенной беспроводной системой управления. Это одновременно и достоинство, и недостаток данной установки. Также разработаны устройства для проведения ремонтных мероприятий на гидротехническом сооружении [16–20], направленные на оптимизацию средств механизации для производства работ. Эти направления являются перспективными для развития теории коррозии и практики защиты бетона от коррозии. Однако данные работы не нашли своего применения для обеспечения качественного сцепления коррозированных поверхностей со свежесделанным бетоном.

В процессе исследования прочности стыков зрелого и твердеющего бетонов в [21] выявлено, что прочность сцепления механически обработанной поверхности с «новым» бетоном выше, чем с необработанной поверхностью бетона. Установлено, что сростки «нового» бето-

на проникают в зрелый бетон с обработанной поверхностью на 33 % глубже. Все это наводит на мысль, что разрушение игольчатых гидросиликатов кальция на поверхности, а также в порах и капиллярах бетона, ранее эксплуатировавшегося в агрессивной среде, является причиной снижения прочности сцепления и ослабления монолитности восстановленного сооружения. Для проверки гипотезы и уточнения результатов проведенных ранее исследований были выполнены ускоренные испытания по определению глубины карбонизации бетона и изучению структуры цементного камня, подвергшегося коррозии.

Методика исследования

Для определения глубины карбонизации образцы бетона подвергались постоянному воздействию агрессивного углекислого газа. Ускоренные испытания проводили по стандартной методике ГОСТ 31383–2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний». Экспериментальная установка (рис. 1) – прототип установки Н. К. Розенталя и П. В. Язева [15]. Для испытания были приготовлены образцы из пескобетона М200 в форме куба размерами 20×20 мм с В/Ц = 0,52. Образцы испытывались после набора бетоном проектной прочности. При проведении испытания в герметичную систему помещали образцы пескобетона при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(75 \pm 3)\%$. Устанавливалось давление 0,3 МПа.

Каждую неделю образец вынимался и подвергался сколу для определения глубины карбонизации. На поверхность скола наносился

индикатор рН среды – 0,1%-й раствор фенолфталеина в этиловом спирте. Фенолфталеин изменяет свою окраску от бесцветной до малиновой в кислой и щелочной средах соответственно. Изменения глубины проникновения углекислого газа в разные периоды времени изображены на рис. 2.

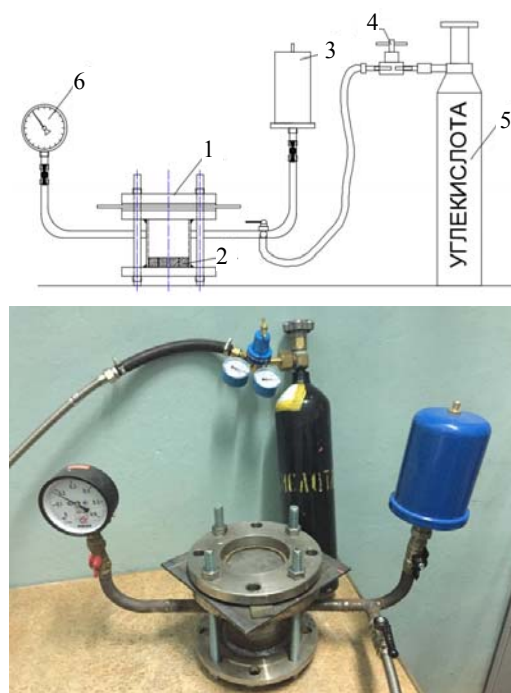


Рис. 1. Установка для испытаний бетона в среде углекислого газа: 1 – герметичная система; 2 – образцы из бетона в форме куба 20×20 мм; 3 – ресивер; 4 – углекислотный редуктор с манометрами; 5 – баллон с CO₂; 6 – манометр

Fig. 1. Installation for testing concrete in environment of carbon dioxide: 1 – sealed system; 2 – samples of concrete in the form of cube 20×20 mm; 3 – receiver; 4 – carbon dioxide reducer with pressure gauges; 5 – CO₂ bottle; 6 – manometer

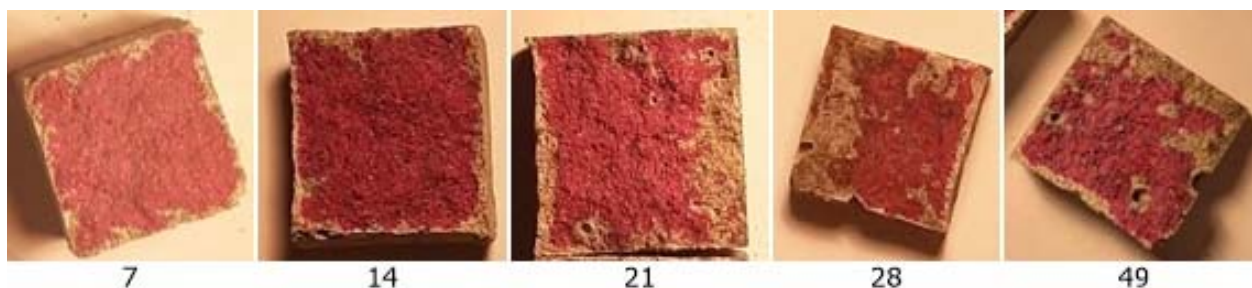


Рис. 2. Фенолфталеиновая проба сколов образцов из пескобетона, выдержанных в среде углекислого газа в разные периоды времени (сут.)

Fig. 2. Phenolphthalein test of chipped samples from sand concrete, kept in carbon dioxide environment at different periods (day)

Кинетика карбонизации бетона описывается первым законом Фика, в соответствии с которым глубина нейтрализации бетона определяется уравнением «корня квадратного от времени» и концентрации агрессивной среды

$$x = \sqrt{2DC_0\tau/m_0}, \quad (3)$$

где x – глубина карбонизированного слоя; D – эффективный коэффициент диффузии CO_2 в бетоне; C_0 – концентрация CO_2 в воздухе; τ – срок эксплуатации; m_0 – реакционная емкость бетона.

Для удобства расчетов уравнение (3) принято записывать в виде

$$x = \sqrt{at}, \quad (4)$$

где $a = 2DC_0/m_0$ – комплексный параметр.

Микроскопом МПБ-2 с кратностью увеличения 24 в направлении, нормальном поверхности образца, измеряли толщину нейтрализованного слоя бетона, которая равна расстоянию от поверхности образца до границы зоны, окрашенной раствором фенолфталеина в малиновый цвет. При обработке результатов рассчитывали среднее значение толщины нейтрализованного слоя бетона. Численные показатели глубины проникновения углекислого газа в бетон отображены на рис. 3. Теоретические значения глубины карбонизации рассчитывались по формулам Приложения В ГОСТ 31383.

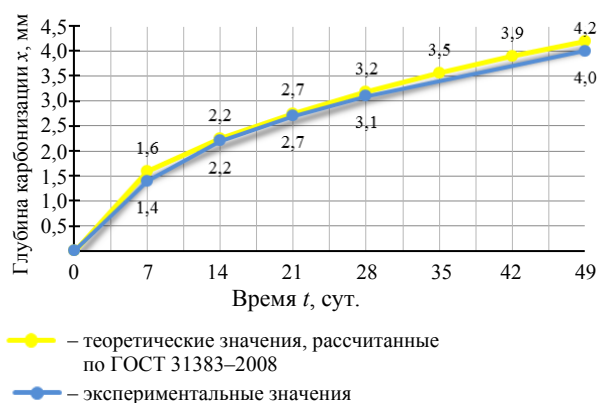


Рис. 3. Скорость карбонизации образцов из пескобетона класса В15

Fig. 3. Sample carbonization rate made of sand concrete of class B15

Образец, находящийся в агрессивной среде углекислого газа 28 сут. (рис. 4), был исследован на электронном сканирующем микроскопе ТМ-1000 в Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН

в трех характерных точках: на поверхности образца, на границе карбонизированной зоны и в зоне, не пораженной коррозией.

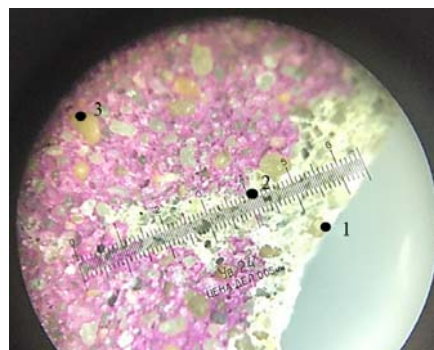


Рис. 4. Микрофотография (увеличение в 24 раза) участка поверхности скола образца, подвергнутого воздействию углекислого газа в течение 28 сут.:

1 – точка на поверхности образца;
2, 3 – точка на расстоянии 2 мм и 6 мм от поверхности соответственно

Fig. 4. Micrography (24 times magnification) of sample cleavage surface area exposed to carbon dioxide for 28 days: 1 – point on sample surface; 2, 3 – point at distance of 2 mm and 6 mm from surface respectively

Результаты исследования приведены на рис. 5. Области увеличения в 7000 раз отображены на рис. 5b, d, f. На снимках хорошо видны изменения структуры цементного камня, произошедшие под воздействием углекислого газа. Гидросиликаты кальция, которые выделяются из раствора в виде волокнистых субмикроструктурных частиц, явственно видны на рис. 5e в не тронутой коррозией зоне. Они «сшивают» материал, обеспечивая его монолитность и гарантированную прочность [9]. В пограничной зоне (рис. 5c) разрушительная работа углекислого газа, который только что сюда проник, уже началась. Можно воочию наблюдать результаты карбонизации. Еще частично сохранились волокнистые субмикроструктурные частицы гидросиликата кальция, но большая их часть разрушена, и формирующийся материал имеет неустойчивую, комковатую структуру.

В цементном камне, пораженном коррозионными процессами, образуются сложные полиминеральные сростки (рис. 5a). Наблюдается отсутствие видимых игольчатых кристаллов гидросиликата кальция, цементирующих структуру материала, что говорит о разрушении первичной структуры цементного камня и, как следствие, о снижении его когезии.

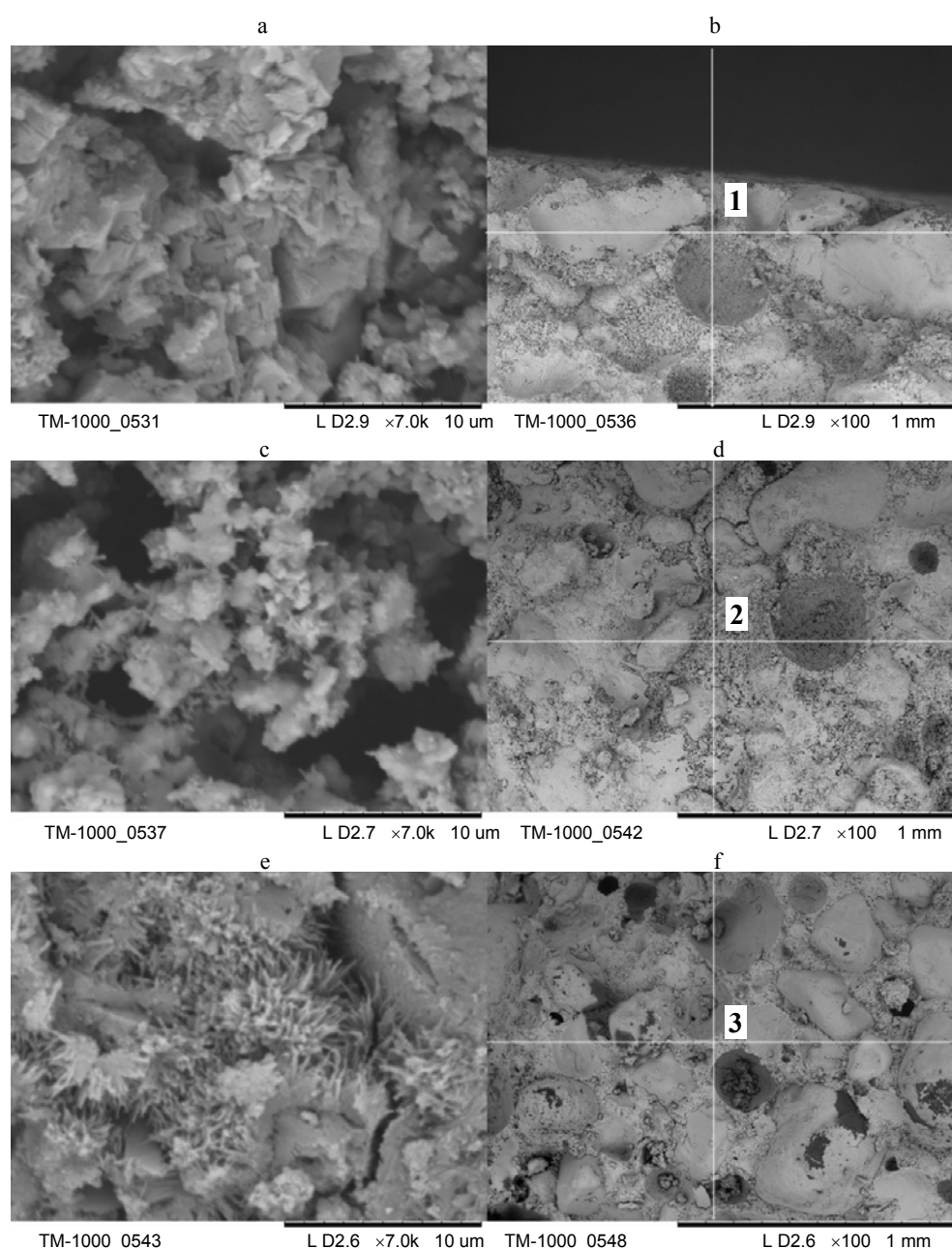


Рис. 5. Структура цементного камня: а, б – на поверхности образца (зона карбонизации) при увеличении в 7000 и 100 раз соответственно; с, д – на расстоянии 2 мм от поверхности (зона частичной карбонизации) при увеличении в 7000 и 100 раз; е, ф – на расстоянии 6 мм от поверхности (некарбонизированная зона) при увеличении в 7000 и 100 раз соответственно

Fig. 5. Structure of cement stone: а, б – on sample surface (carbonization zone) with increase of 7000 and 100 times, respectively; с, д – at distance of 2 mm from surface (zone of partial carbonization) with increase of 7000 and 100 times, respectively; е, ф – at distance of 6 mm from surface (non-carbonized zone) with increase of 7000 and 100 times, respectively

ВЫВОДЫ

1. Через поры и капилляры зрелого бетона углекислота проникает в его толщу. При концентрации углекислого газа 5 % она достигает

4,0 мм в первые 49 сут. ускоренной карбонизации, что при пересчете на естественную концентрацию углекислого газа в воздухе достаточно хорошо коррелируется с результатами исследований [4].

2. Микрофотографии структуры цементного камня в областях, пораженных и не тронутых карбонизацией, показывают, что структура материала серьезно меняется и сшивающие ее игольчатые гидросиликаты кальция практически не обнаруживаются, снижая, в конечном счете, его прочность. Это положение подтверждается результатами исследований сцепления «старого» и «нового» бетонов, уложенных с большими температурными градиентами [7].

3. Опыт использования горячих смесей при восстановлении бетонных конструкций, подвергшихся карбонизации, учитывая проникновение новообразований в «старый» бетон на глубину 20–30 мм, показывает, что вновь образовавшиеся цементные сростки могут насквозь прошить пораженные слои и укорениться в неповрежденном материале, что обеспечит надежное сцепление «старого» бетона с «новым».

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
2. Exposure of Mortars to Cyclic Chloride Ingress and Carbonation / J. Backus [et al.] // *Advances in Cement Research*. 2013. Vol. 25, No 1. 3–11. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029>.
3. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / С. Н. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 2. 204 с.
4. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений / Е. Е. Шалый [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 106–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113>.
5. Шалый, Е. Е. Анализ деградации бетона сооружений на острове Сахалин / Е. Е. Шалый // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного государственного технического университета*. 2018. Т. 34, № 1. С. 65–76.
6. Philip, N. Perkins Concrete Structures: Repair, Waterproofing and Protection / N. Philip. Applied Science Publishers LTD. London, 1976. 256 p.
7. Молодин, В. В. Сцепление зрелого и твердеющего бетона, уложенного с термообработкой в зимних условиях / В. В. Молодин, Д. А. Иванов // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 4. С. 82–93.
8. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
9. Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.
10. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 208 с.

11. Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости / Н. К. Розенталь. М., 2005. 36 с.
12. Овчинников, И. И. Моделирование кинетики деформирования армированных конструкций в специальных эксплуатационных средах / И. И. Овчинников, В. Н. Мигунов, И. Г. Овчинников. Пенза: ПГУАС, 2014. С. 280.
13. Яковлев, В. В. Прогнозирование коррозионной стойкости бетона и железобетона в агрессивных жидких и газовых средах / В. В. Яковлев. Уфа, 2000. 38 с.
14. Установка для определения кинетики карбонизации бетона с беспроводной системой управления: пат. 137728U1 Рос. Федерации, МПК G01N 33/38, C04B 40/00 / В. М. Латыпов, П. А. Федоров, Т. З. Гильмутдинов. Оpubл. 27.02.2014.
15. Установка для определения кинетики карбонизации бетона: а. с. № 388227 (СССР) / Н. К. Розенталь, П. В. Язев. Оpubл. 22.06.1973.
16. Устройство для проведения ремонтных работ на гидротехническом сооружении: пат. 170227U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / В. В. Рублев, С. В. Дедов, С. С. Гучиев, Е. В. Рогожников. Оpubл. 18.04.2017.
17. Устройство для проведения ремонтных работ на различных участках гидротехнических сооружений: пат. 2683479C1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 28.03.2019.
18. Устройство для проведения ремонтных работ на внутренних углах гидротехнических сооружений: пат. 181039U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 04.07.2018.
19. Устройство для проведения ремонтных работ на угловых участках гидротехнических сооружений: пат. 182712U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 29.08.2018.
20. Устройство для проведения ремонтных работ на криволинейных участках гидротехнических сооружений: пат. 182778U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 31.08.2018.
21. Навоян, А. Х. Исследование сцепления твердеющего бетона со зрелым при замоноличивании стыков и ремонте конструкций / А. Х. Навоян, В. В. Молодин // *Труды НГАСУ*. 2020. Т. 23, № 1. С. 107–121.

Поступила 19.11.2020

Подписана в печать 26.01.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. I., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroyizdat. 536 (in Russian).
2. Backus J., McPolin D., Basheer M., Long A., Holmes N. (2013) Exposure of Mortars to Cyclic Chloride Ingress and Carbonation. *Advances in Cement Research*, 25 (1), 3–11. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029>.

3. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack Resistance and Durability of Structural Concrete under Thermal and Corrosive Effects. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University. 204 (in Russian).
4. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N., Stepanova A. V. (2018) Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (2), 106–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113> (in Russian).
5. Shalyi E. E. (2018) Analysis of Concrete Degradation of Structures on the Island of Sakhalin. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dal'nevostochnogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Far Eastern Federal University School of Engineering Bulletin*, 34 (1), 65–76 (in Russian).
6. Philip H. (1976) *Perkins Concrete Structures: Repair, Waterproofing and Protection*. Applied Science Publishers LTD. London. 256.
7. Molodin V. V., Ivanov D. A. (2019) Bonding of Mature and Hardening Concrete, Laid with Heat Treatment in Winter Conditions. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (4), 82–93 (in Russian).
8. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
9. Mchedlov-Petrosyan O. P. (1971) *Chemistry of Inorganic Building Materials*. Moscow, Stroyizdat Publ. 224 (in Russian).
10. Alekseev S. N., Rosental N. K. (1976) *Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Structures in an Aggressive Industrial Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ. 208 (in Russian).
11. Rosental N. K. (2005) *Corrosion Resistance of Cement Concretes with Low and Very Low Permeability*. Moscow. 36 (in Russian).
12. Ovchinnikov I. I., Migunov V. N., Ovchinnikov I. G. (2014) *Modeling of Deformation Kinetics of Reinforced Structures in Special Operating Environments*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction. 280 (in Russian).
13. Yakovlev V. V. (2000) *Prediction of the Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete in Aggressive Liquid and Gas Environments*. Ufa. 38 (in Russian).
14. Latypov V. M., Fedorov P. A., Gilmudinov T. Z. (2014) *Installation for Determining Kinetics of Concrete Carbonation with Wireless Control System*: Patent No 137728U1 Russian Federation (in Russian).
15. Rosental N. K., Yazev P. V. (1973) *Installation for Determining Kinetics of Carbonization Concrete*: Invention Certificate No 388227 USSR (in Russian).
16. Rublyov V. V., Dedov S. V., Guchiev S. S., Rogozhnikov E. V. (2017) *Device for Carrying out Repair Work on Hydro-Technical Structure*: Patent No 170227U1 Russian Federation (in Russian).
17. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2019) *Device for Carrying Out Repair Work on Various Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 2683479C1 Russian Federation (in Russian).
18. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Inner Corners of Hydraulic Structures*: Patent No 181039U1 Russian Federation (in Russian).
19. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Corner Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 182712U1 Russian Federation (in Russian).
20. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Curved Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 182778U1 Russian Federation (in Russian).
21. Navoyan A. Kh., Molodin V. V. (2020) Investigation of Adhesion of Hardening Concrete with Mature Concrete During Monolithing of Joints and Repair of Structures. *Trudy NGASU [Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering – SIBSTRIN]*, 23 (1), 107–121 (in Russian).

Received: 19.11.2020

Accepted: 26.01.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337>

УДК 666.031; 693.54

Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Батыновский¹⁾,
кандидаты техн. наук А. И. Бондарович¹⁾, Н. Н. Калиновская²⁾, П. В. Рябчиков¹⁾

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

²⁾ООО «ПолипластХИМ» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Приведены результаты разработки и реализации технологии самоуплотняющегося тяжелого конструкционного бетона и технологии бетонирования с его использованием крупнейшей на территории Беларуси фундаментной плиты (объем бетона около 9100 м³) высотного здания на объекте «Строительство многофункционального комплекса в г. Минске в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка». Отражены результаты исследований, обеспечившие получение самоуплотняющегося бетона класса С35/45 водонепроницаемостью до W20 (при требуемой по проекту W12) из бетонных смесей предельной по распылу конуса марки РК6 для трех разных по степени армирования слоев фундаментной плиты (нижнего, среднего и верхнего) при общей высоте конструкции 3,5 м и размерах в плане 83×34 м. Разработаны и реализованы технология непрерывного (бесшовного) бетонирования, позволившая за 42 ч непрерывной работы бездефектно уложить в конструкцию примерно 9100 м³ бетона, а также система технологических мер, предотвратившая температурное трещинообразование бетона. Однородность физико-механических свойств бетона, подтвержденная контрольными испытаниями, обеспечена за счет равномерной подачи бетонной смеси (от шести бетононасосов одновременно) слоями высотой 200–300 мм при расстоянии между точками подачи около 5–6 м и вертикальном расположении «хоботов» бетоноводов в течение подачи бетона в каждую точку, а также тем, что время подачи очередного объема бетона было значительно меньше времени схватывания ранее уложенного бетона (при общей скорости бетонирования ≤0,1 м/ч). При разработке, исследованиях и реализации проекта использовали стандартизированные и оригинальные методики испытаний бетонных смесей, кинетики твердения и свойств затвердевшего бетона. Контрольные испытания физико-механических свойств и характеристик бетона, осуществленные в БНТУ совместно с контролирующими ход строительства уполномоченными организациями, а также в независимых (сторонних) организациях, подтвердили их соответствие проектным требованиям.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, массивная конструкция, фундаментная плита, высотное здание, бетон, армирование, температура, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость

Для цитирования: Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона / Э. И. Батыновский [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 329–337. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337>

Self-Compacting Concrete and Concreting Technology for Foundation Block Using 9000 Cubic Meters of Concrete

E. I. Batyanovskiy¹⁾, A. I. Bondarovich¹⁾, N. N. Kalinovskaya²⁾, P. V. Ryabchikov¹⁾

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

²⁾LLC “PolyplastHIM” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of the development and implementation of the technology of self-compacting heavy structural concrete and the technology of concreting with its use of the largest foundation slab in Belarus (concrete volume ~9100 m³) of a high-rise building at the facility “Construction of a multifunctional complex in Minsk within the boundaries of Filimonova Street – Avenue Nezavisimosty – Makayonka Street”. The results of research are shown, which ensured the production of self-compacting concrete of class C35/45 with water resistance up to W20 (with the required W12 according to the project) from concrete mixtures of the maximum cone expansion of the PK6 (RK6) grade for three zones of the foundation slab different in degree of reinforcement: lower, middle and upper, with a total structure height of 3.5 m and plan dimensions ~ (83×34) m. The technology of continuous (seamless) concreting has been developed and implemented, which made it possible to lay ~9100 m³ of concrete into the structure without defects within 42 hours of continuous operation, and a system of technological measures that prevented temperature cracking in concrete. The homogeneity of the physical and mechanical

Адрес для переписки

Батыновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
batyanovskij@bntu.by

Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
batyanovskij@bntu.by

properties of concrete, confirmed by control tests, is ensured due to the uniform supply of the concrete mixture (from six concrete pumps at the same time) in layers 200–300 mm high with a distance between the supply points of about 5–6 m and the vertical arrangement of the “trunks” of the concrete pipes during delivery of concrete to each point, as well as the fact that the time for feeding the next volume of concrete was significantly less than the setting time of the previously laid concrete (with a total concreting speed ≤ 0.1 m/h). Standardized and original test methods for concrete mixtures, hardening kinetics and properties of hardened concrete have been used during the development, research and implementation of the project. Control tests of physical and mechanical properties and characteristics of concrete, carried out at BNTU together with authorized organizations controlling the progress of construction, as well as in independent (third-party) organizations, have confirmed their compliance with the design requirements.

Keywords: self-compacting concrete, massive construction, foundation slab, high-rise building, concrete, reinforcing, temperature, strength, frost resistance, water tightness

For citation: Batyanovskiy E. I., Bondarovich A. I., Kalinovskaya N. N., Ryabchikov P. V. (2021) Self-Compacting Concrete and Concreting Technology for Foundation Block Using 9000 Cubic Meters of Concrete. *Science and Technique*. 20 (4), 329–337. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337> (in Russian)

Введение

Одним из основных проблемных вопросов бетонирования массивных фундаментных плит и подобных конструктивных элементов зданий и сооружений является недопущение критического термонапряженного состояния конструкции, превышающего предел прочности бетона массива на растяжение, и образования температурных трещин. Причина – саморазогрев бетона за счет аккумуляции в объеме конструкции теплоты от экзотермии (тепловыделения) твердеющего (гидратирующегося) цемента. Опасность представляет градиент температур по сечению конструкции между внутренним (разогретым) объемом бетона и более холодными его объемами по внешнему контуру конструкции. Возникающие при неравномерном расширении касательные напряжения в объеме бетона внешних слоев по контуру конструкции могут привести к их растрескиванию и неконтролируемому ухудшению физико-механических и эксплуатационных свойств бетона.

Задачу снижения уровня термонапряженного состояния массивных конструкций при их возведении (устройстве) решают различными способами, включая создание трубчатых систем искусственного понижения температуры твердеющего бетона за счет отвода выделяющейся теплоты при циркуляции по трубам разных хладагентов. В проектном решении конструкции фундаментной плиты высотного здания (рис. 1) не предусматривалось создание системы искусственного охлаждения, и задача снижения термонапряженного состояния конструкции массива была решена технологическими приемами на стадии разработки составов бетона, при ведении бетонных работ, а также мерами последующего ухода за твердеющим бетоном, что отражено в материале статьи.

Оценка условий бетонирования фундаментной плиты и составы бетона

Анализ проектной документации монолитной железобетонной фундаментной плиты высотного

административного здания № 1 (частично представленной на рис. 1) показал, что максимальная степень армирования соответствует нижнему слою плиты на высоту примерно 850 мм (отметки: –12,950 и –11,950). При этом горизонтальное армирование плиты (нижняя рабочая арматура) взаимоувязывается с вертикальной арматурой (арматурными выпусками) буронабивных свай (глубина заложения до 35 м) свайного поля плиты. В этих зонах, а также в зонах армирования будущих колонн и силового ядра здания в верхнем слое плиты сводится к минимуму просвет между вертикально направленными арматурными элементами этих конструкций и горизонтально направленными арматурными элементами плиты. Согласно проектной документации, минимальный просвет между стержнями арматуры (исключая естественные места их взаимных контактов при вязке) составляет не более 25 мм при толщине защитных слоев ее анкеров 40–50 мм. При этом средний слой по высоте плиты характеризуется относительно низкой степенью армирования, что с позиций ведения бетонных работ не создает существенных помех в их реализации с использованием самоуплотняющегося бетона, а верхняя (или – финишная) зона по высоте плиты занимает промежуточное положение по степени армирования, выполняемого (с учетом толщины верхнего защитного слоя бетона) на отметках –9,850 и –9,450.

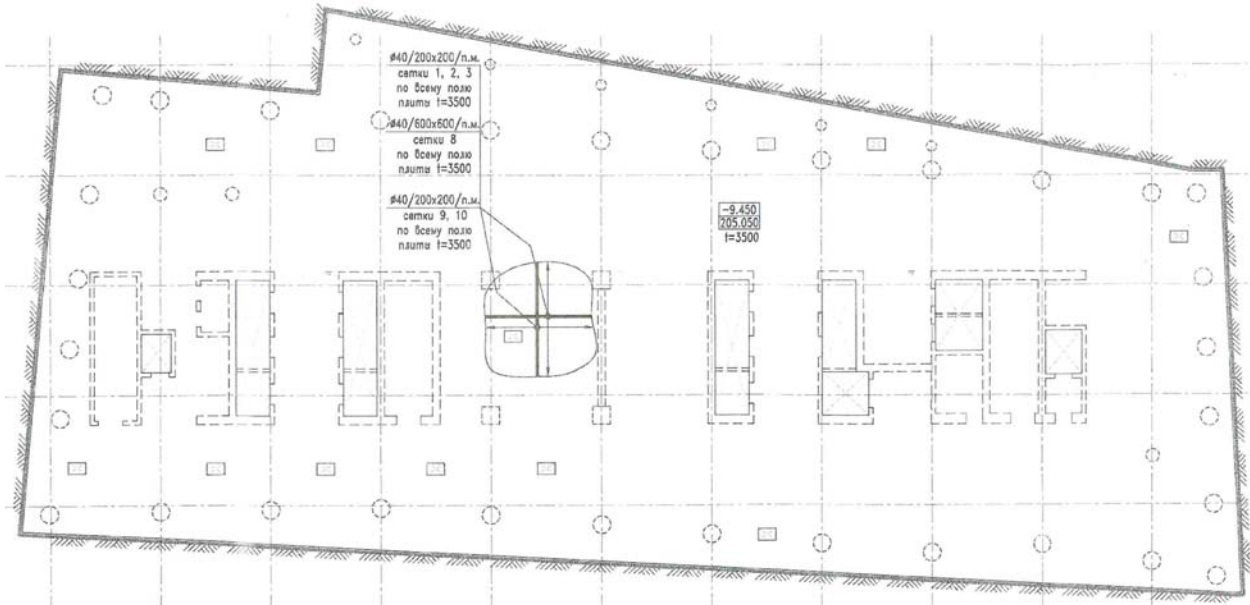
Однако в этой части плиты высока степень армирования опорных зон будущих колонн и силового ядра здания. Кроме этого, она наиболее подвержена влиянию внешней среды, поскольку ее поверхность есть зона испарения и развития теплообменных процессов с контактирующей средой, с одной стороны, а с другой – бетон финишного слоя в процессе твердения подвержен сложному сочетанию воздействий от собственных усадочных и температурных деформаций из-за градиента температур по сечению (объему) плиты. С учетом изложенного были разработаны

три состава (табл. 1) самоуплотняющегося бетона, заявленного в проектной документации класса по прочности на сжатие С35/45, для непрерыв-

ного (бесшовного) бетонирования фундаментной плиты (без дополнительного уплотнения механическим воздействием).

a

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПЛИТА, АРМИРОВАНИЕ, ПЛАН СЕТОК 1, 2, 3, 8, 9, 10



b

СХЕМА АРМИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ
(условно показано максимальное количество сеток)

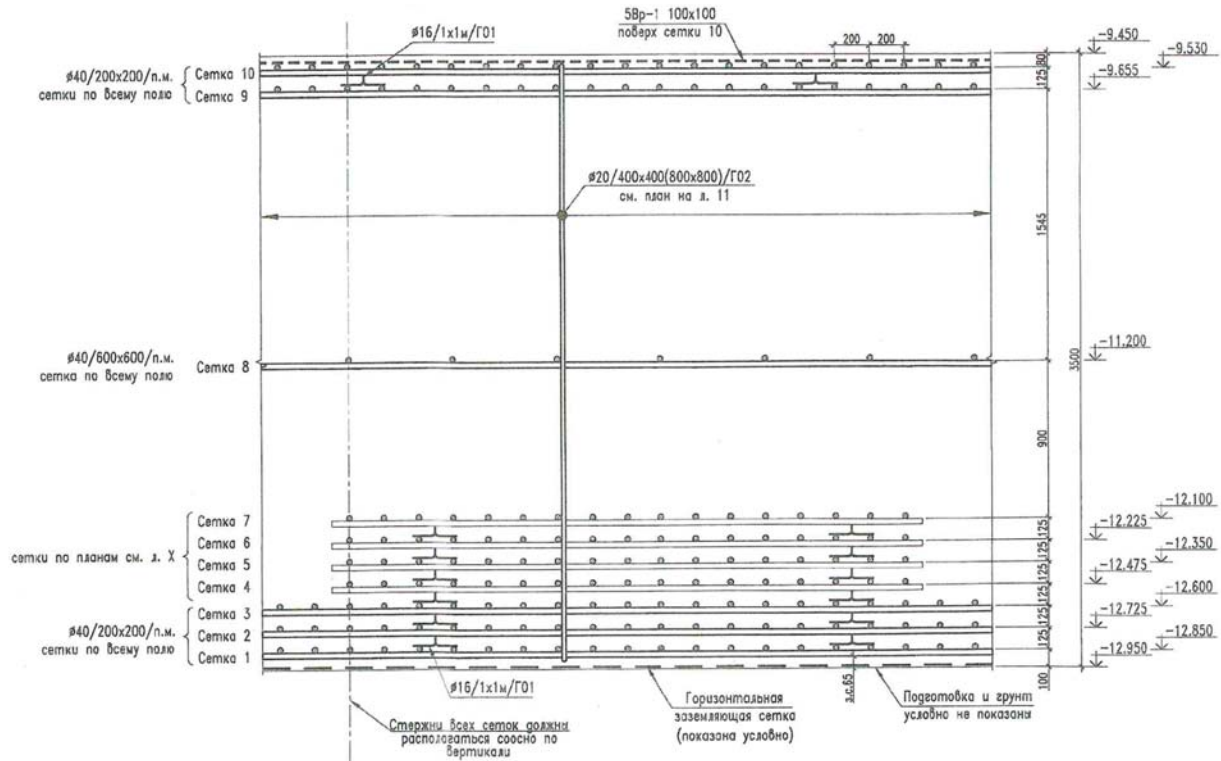


Рис. 1. Монолитная фундаментная плита: а – план плиты; б – фрагмент сечения по высоте плиты

Fig. 1. Monolithic foundation slab: a – slab plan; b – fragment of section along height of slab

Составы бетона
Concrete compositions

Слой плиты, отметка, примерный объем бетона, м ³	Расход* составляющих бетона, кг/м ³						
	Цемент [1, 2]	Щебень (вид, фракция, мм) [3, 4]	Песок [5]	Микро- кремне- зем МКУ-85 [6]	Фибра [7]	Пластифи- катор «Лина- микс ПК» [8]	Вода затво- рения [9]
Нижний, (–12.950)–(–11.950), 2600	450	890 (Кубовид- ный, 5–10)	890	50	–	16,7	180
Средний, (–11.950)–(–9.850), 5400	400	930 (2 группа, 5–20)	930	44	–	10,36	165–170
Верхний (финишный), (–9.850)–(–9.450), 1100	400	980 (2 группа, 5–20)	880	44	0,6	12,58	165–170

* Удовлетворяющий требованиям действующей нормативной технической документации [1–9].
 ** Дозировка пластификатора (концентрация раствора $C = 30\%$) приведена в расчете от общей массы «цемент + микро-кремнезем».

Технологическое решение задачи минимизации термонапряженного состояния фундаментной плиты

Условия бетонирования за один прием (непрерывно, бесшовно) такого массивного сооружения, каким является фундаментная плита с объемом бетона ~9100 м³, ставят задачи минимизации температуры саморазогрева бетона и снижения градиента температур по сечению (объему) конструкции плиты. В проектном решении конструкции плиты, подлежавшей бетонированию, не предусматривалось искусственных мер по снижению температуры саморазогрева бетона. В этой связи задача решалась за счет: во-первых, использования цемента с пониженной экзотермией в сочетании с минимально необходимым содержанием его в бетоне; во-вторых, применения комплексной химической добавки-пластификатора, характеризующейся замедляющим гидратацию клинкерной части цемента эффектом и снижением начального водосодержания бетона; в-третьих, последующего ухода за твердеющим бетоном.

Для реализации проекта был сделан заказ на выпуск 4,5 тыс. т цемента в ОАО «Белорусский цементный завод», который затем распределили по пяти заводам-поставщикам бетона (отобранным предварительно из десяти претендентов). Этот вид цемента соответствует марке ЦЕМ II/B-III 42,5Н по ГОСТ 31108 [1], классу ЦЕМ II/B-S D (35–40) по СТБ EN 197-1 [2] с активностью 45 МПа и коэффициентом нормальной густоты 0,275. Он характеризуется

содержанием клинкерной части 60–65 % массы (включая 3–4 % добавки гипса для регулирования сроков схватывания) и 40–35 % соответственно введенного в состав при помоле совместно с клинкером и гипсом доменного гранулированного шлака. Согласно данным Белорусского цементного завода о вещественном и минералогическом составе клинкера, следует, что в пересчете на тонну шлакопортландцемента его клинкерная часть составляет 600–650 кг, а клинкерных минералов, характеризующихся наибольшей экзотермией, содержится от ее массы: $C_3S \sim 58,92\%$; $C_3A \sim 6,97\%$. С учетом проектного расхода вяжущего – примерно 400–450 кг/м³ бетона – его клинкерная часть составляет не более 260–290 кг/м³ бетона, а общая доля ($C_3S + C_3A$) ~ 170–190 кг/м³ бетона с содержанием наибольшего по тепловыделению C_3A 17–19 кг/м³ (или 4,0–4,5 % от массы вяжущего). Это обеспечило соответствие выбора данного вида вяжущего цели и задачам по снижению температуры саморазогрева бетона в массиве и снижению сопровождающих это явление температурных деформаций конструкции плиты, подтвержденных результатами контроля ее качества.

Существенную роль в снижении термонапряженного состояния твердеющего массива играет темп тепловыделения при гидратации цемента. Для решения задачи по сдерживанию процесса гидратации цемента, увеличению времени сохранения подвижности бетонной смеси на требуемом уровне и начала схватывания бетона (по техническому заданию до 6–12 ч) был

апробирован и использовался поликарбоксилатный суперпластификатор «Динамикс ПК», представляющий собой смесь двух типов поликарбоксилатов, в которую в качестве замедлителей потери подвижности (схватывания) дополнительно вводились натриевые соли лигносульфонатов и гидроксикарбоновых кислот. В результате совокупного применения вяжущего с пониженной экзотермией и химической добавки с замедляющим процесс гидратации цемента действием был обеспечен (несмотря на достаточно высокую начальную температуру бетонной смеси около (15–20) °С и воздуха до 25 °С в период ведения работ) замедленный темп саморазогрева бетона массива до максимума (65–68) °С при относительно равномерном нагреве по сечению конструкции – наибольший перепад температуры не превышал (30–35) °С между нижним, средним и верхним слоями бетона.

С целью предотвращения трещинообразования верхнего (финишного) слоя бетона плиты в его состав вводили полипропиленовую фибру по ТУ 2272-006-13429727 [7] марки ВСМ-II-12. Минимизация трещинообразования поверхностного слоя бетона базируется на эффекте дисперсного «армирования» его структуры при хаотичном, равномерном и разнонаправленном расположении волокон фибры в объеме цементного камня и бетона в целом.

Для усиления эффекта предотвращения усадочного трещинообразования бетона поверхности конструкции организовали бассейновый уход за ним. Через 10–12 ч от момента окончания бетонных работ вся поверхность плиты была залита водой слоем 50–70 мм, и бетон твердел в этих условиях 14 сут. После слива бассейна до проектного возраста (28 сут.) бетон твердел под гидроизолирующим пленочным покрытием (с постоянным поддержанием по-

верхности во влажном состоянии путем подлива воды). Здесь следует отметить, что палуба опалубки была защищена сплошным гидроизолирующим покрытием, предотвращающим любые потери влаги и цементного теста по стыкам щитов.

Особенности ведения бетонных работ по обеспечению качества и однородности свойств бетона в конструкции плиты

Проектные (и превышающие проектные) физико-технические свойства и характеристики бетона фундаментной плиты, подтвержденные контролирующими строительством уполномоченными органами, были обеспечены своевременным (май – сентябрь 2020 г.) выполнением БНТУ научно-исследовательских работ по договору № 2917/20кбр с Rizzani de Eccher S.p.A – их заказчиком, на основании которых разрабатывались составы бетона и технологический регламент на ведение бетонных работ. Кроме того, этому способствовала четкая организация технологического процесса непосредственно бетонирования фундаментной плиты со стороны Rizzani de Eccher S.p.A, обеспечившей укладку ~9100 м³ бетона за 42 ч ведения работ.

Важной составляющей успешного бетонирования фундаментной плиты был постоянный (сплошной) контроль за качеством как поставляемой от пяти производителей бетонной смеси, так и подачи и укладки бетона в опалубку. Оценку нужной формуемости (удобоукладываемости) бетонной смеси по распылу конуса осуществляли на объекте по каждому рейсу автобетоносмесителей с учетом требований табл. 2.

Таблица 2

Свойства бетонной смеси
Concrete mix properties

Номер состава бетона по табл. 1	Плотность бетонной смеси $\rho_{см}^0$, кг/м ³	Воздухововлечение, %	Удобоукладываемость по растеканию конуса*, см	Вязкость, с	Растворотделение, %	Сохранность свойств (текучести)
1	2440 ± 20	2–3	>62 (до 75)	5–7	~2,0	>360
2	2460 ± 20	2–3	>62 (до 72)	5–7	~3,0	>360
3	2460 ± 20	3–4	>62 (до 70)	7–10	~2,0	>360
*Уменьшение растекаемости за 6 ч составляет 10–15 % (при нормируемом значении ≤50 %).						

Данные требования получены при оценке результатов исследований, частично представленных на рис. 2, 3.



Fig. 2. Examples of assessing mobility of concrete mixture in the process of developing concrete compositions: а – bottom layer (cuboid crushed stone fraction 5–10 mm); б – middle layer (traditional crushed stone fraction 5–20 mm); в – top layer (traditional crushed stone fraction 5–20 mm, fiber)

Одновременно на объекте отбирали пробы и изготавливали контрольные образцы (кубы

с ребрами 100 и 150 мм, цилиндры высотой и диаметром 150 мм, призмы 100×100×400 мм) для оценки кинетики роста и уровня прочности бетона, морозостойкости, водопоглощения, водонепроницаемости и модуля упругости бетона в разных частях конструкции плиты (табл. 3).

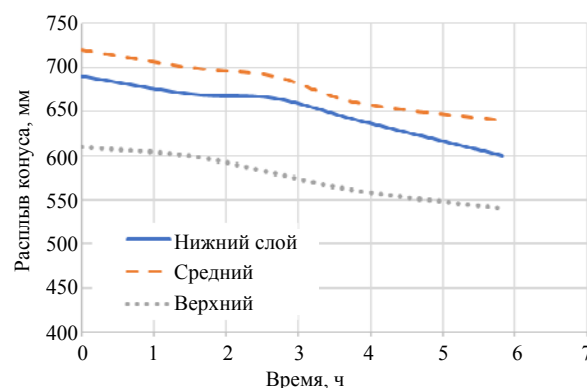


Рис. 3. Изменение расплава конуса во времени
Fig. 3. Time variation of cone spreading

На рис. 4 частично представлены данные о кинетике роста прочности бетона, установленные на стадии разработки технологического регламента и подтвержденные последующими испытаниями контрольных образцов, изготовленных на объекте в процессе ведения бетонных работ, а в последующем – при испытании кернов, отобранных из конструкции (рис. 5), и методом неразрушающего контроля (отрыва со скалыванием).

Таблица 3

Физико-технические характеристики бетона фундаментной плиты [10–14]
Physical and technical characteristics of concrete foundation slab [10–14]

Состав бетона для слоя плиты	Физико-технические характеристики бетона* в возрасте 28 сут.						Прочность на сжатие бетона кернов***, МПа
	Прочность, МПа			Модуль упругости, ГПа	Марка по водонепро- ницаемости**	Морозо- стойкость, марка**	
	на сжатие	на растяжение (раскалывание)	на растяжение при изгибе				
Нижнего	72,3	4,2	5,20	44,5	W20 (W12)	Не менее F300 (F150)	74,4
Среднего	70,5	4,0	5,15	39,5	W20 (W12)	Не менее F300 (F150)	68,9
Верхнего (финишного)	72,5	4,4	5,65	44,6	W20 (W12)	Не менее F300 (F150)	72,1
* Определены по образцам, изготовленным при подборе составов бетона конструкции плиты. ** При значении по проекту W12 и F150. *** Определена по образцам-кернам, отобранным из конструкции плиты.							

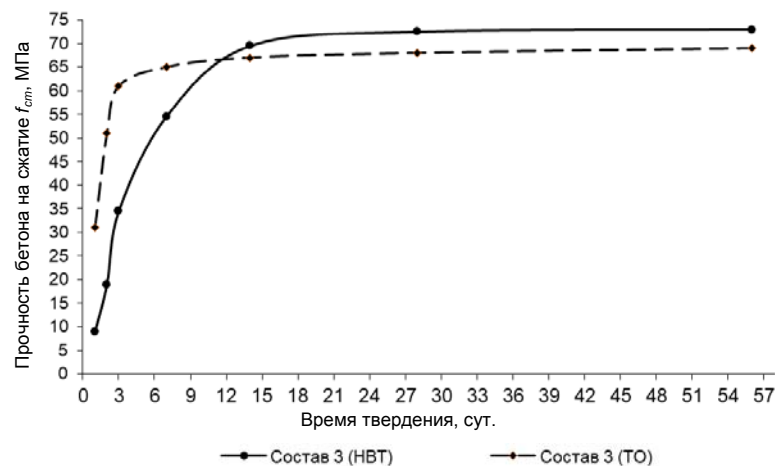


Рис. 4. Кинетика роста прочности бетона состава № 3 (табл. 2) (традиционный щебень фр. 5–20 мм с фиброй)

Fig. 4. Strength development kinetics of concrete of composition No 3 (Tab. 2) (traditional crushed stone fraction 5–20 mm size with fiber)



Рис. 5. Фотографии ядра (а) и образцов из него (b)

Fig. 5. Photos of core (a) and samples from it (b)

Во всех приведенных случаях к возрасту 14 сут. и более прочность бетона оцениваемых составов соответствовала классу С35/45. Так, по СТБ 1544 [15] и ГОСТ 18105 [16] при коэффициенте вариации $V_m = 13,5\%$ уровень обеспечиваемой (требуемой) прочности, определенной на образцах-кубах для класса С35/45: $f_{cm} = 45 / (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 57,8$ МПа. А по действующему на территории Беларуси СТБ EN 206 [17] уровень характеристической прочности на сжатие для данного класса: $f_{c.cube}^G \geq 45 + 4 = 49$ МПа.

Следует отметить, что фактический коэффициент вариации прочности на сжатие бетона, рассчитанный для объединенной совокупности

трех составов бетона по результатам испытаний всех серий образцов (как по данным табл. 3, так и по другим данным оценки прочности), изготовленных в разное время и испытанных в возрасте 28 и 56 сут., составил соответственно: $V_{m28} \sim 7,8\%$; $V_{m56} \sim 5,7\%$.

Обеспечение качественных характеристик затвердевшего бетона массива достигнуто за счет умеренно равномерного распределения температуры в его объеме в период твердения (рис. 6). Показания регулярного контроля по 99 датчикам (в 33 точках конструкции с тремя датчиками: в центре по высоте сечения плиты и в 100 мм от ее низа и верха) подтвердили замедление интенсивности тепловыделения цемента и саморазогрева бетона, растянувшееся на 5–7 сут. после бетонирования. При этом максимальный перепад температуры по сечению конструкции высотой 3,5 м не превысил (30–35) °С, т. е. составлял не более 2 °С на 10 см слоя бетона между центральной частью и периферией массива, что не представляет опасности с позиций температурного трещинообразования в его объеме. Затем перепад температуры закономерно снижался и к проектному возрасту бетона составил около (15–12) °С. Как следствие, результаты оценки прочности бетона по отобраным (на глубину 3,2–3,4 м) из конструкции плиты образцам-кернам (рис. 6) полностью подтвердили соответствие ее значений проектным требованиям и результатам, полученным при разработке составов бетона для нижнего, среднего и верхнего слоев плиты (табл. 3).

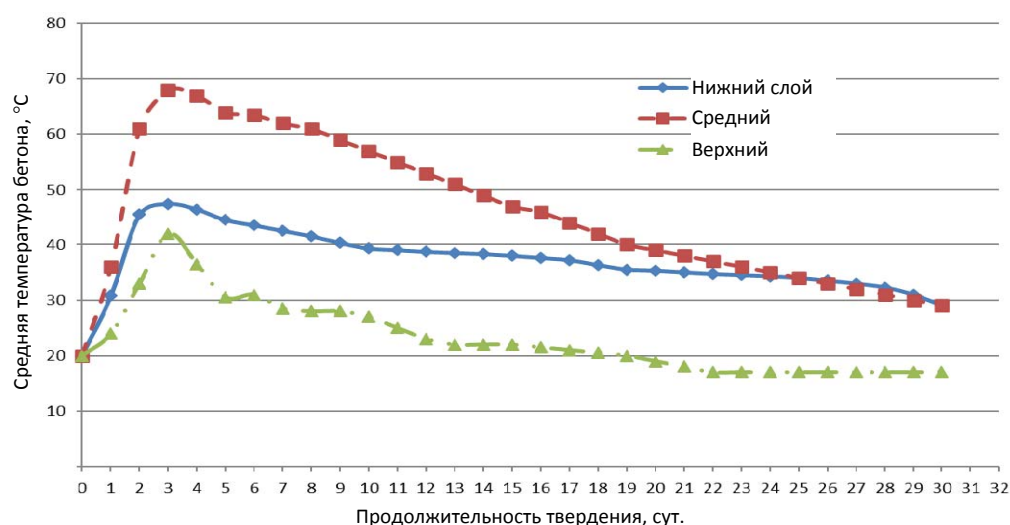


Рис. 6. Данные контроля изменений температуры твердеющего бетона за период с 16.09.2020 по 16.10.2020 (до момента ее стабилизации)

Fig. 6. Data from monitoring changes in temperature of hardening concrete for the period from 16.09.2020 to 16.10.2020 (until it stabilizes)

ВЫВОДЫ

1. Бетонные работы по возведению конструкции фундаментной плиты высотного здания на объекте «Строительство многофункционального комплекса в г. Минске в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка» выполнены с соблюдением соответствующих требований действующей нормативной технической документации, регламентирующей производство бетонных работ при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций, включая требования СН 1.03.01.

2. Качество бетона возведенной конструкции фундаментной плиты подтверждено совокупностью данных контроля прочности на сжатие разрушающим (контрольные образцы и образцы-керны, отобранные вертикально из конструкции плиты) и неразрушающим методами (отрывом со скалыванием, осуществленным по боковым граням конструкции), подтвердившими соответствие прочности классу С35/45, а также оценкой водонепроницаемости (марка W20) и морозостойкости (марка F300), что превышает соответствующие проектные требования к бетону конструкции.

3. Белорусский национальный технический университет готов к сотрудничеству с заинтере-

ресованными предприятиями и организациями по отраженному в статье и другим направлениям деятельности в области строительного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2016. Введ. 01.03.2017. Минск: Госстандарт, 2016. 18 с.
2. Цемент. Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общестроительных цементов: СТБ EN 197-1–2015. Введ. 01.01.2016. Минск: Госстандарт, 2016. 40 с.
3. Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия: СТБ 1311–2002. Введ. 01.07.2002. Минск: Минстройархитектуры, 2002. 24 с.
4. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267–93. Введ. 01.01.1995. М.: Госстрой, 1995. 11 с.
5. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736–2014. Введ. 01.04.2015. М.: Госстрой, 2017. 12 с.
6. Микрокремнезем для бетона. Часть 1. Определения, требования и критерии соответствия: СТБ EN 13263-1–2012. Введ. 01.01.2013. Минск: Госстандарт, 2012. 26 с.
7. Волокно строительное микроармирующее: ТУ 2272-006-13429727–2007. Введ. 20.05.2007. Челябинск, Россия, 2007. 10 с.
8. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. Введ. 01.01.1099. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 40 с.

9. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 40 с.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартиформ, 2018. 36 с.
11. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести: ГОСТ 24544–81. Введ. 01.01.1982. М.: Госстрой, 1980. 26 с.
12. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуансона: ГОСТ 24452–80. Введ. 01.01.1982. М.: Госстрой, 1980. 20 с.
13. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5–84. Введ. 01.07.1985. М.: Госстрой, 1978. 15 с.
14. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании: ГОСТ 10060.2–95. Введ. 01.09.1996. М.: МНТКС, 1996. 8 с.
15. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 36 с.
16. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности: ГОСТ 18105–2018. Введ. 01.03.2020. М.: Стандартиформ, 2019. 20 с.
17. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206–2016. Введ. 01.07.2017. Минск: Госстандарт, 2016. 108 с.
18. Возведение строительных конструкций зданий и сооружений: СН 1.03.01–2019. Введ. 16.08.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2019. 131 с.
5. State Standard 8736–2014. *Sand for Construction Works. Technical Specifications*. Moscow, Gosstroj, 2017. 12 (in Russian).
6. STB EN 13263–1–2012. *Microsilica for Concrete. Part 1. Definitions, Requirements and Compliance Criteria*. Minsk, Gosstandart Publ., 2012. 26 (in Russian).
7. TU [Technical Specifications] 2272-006-13429727–2007. *Building Micro-Reinforcing Fiber*. Chelyabinsk, Russia, 2007. 10 (in Russian).
8. STB 1112–98. *Concrete Admixtures. General Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 40 (in Russian).
9. STB 1114–98. *Water for Concrete and Mortar. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 40 (in Russian).
10. State Standard 10180–2012. *Concrete. Methods for Determining the Strength of Control Samples*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 36 (in Russian).
11. State Standard 24544–81. *Concrete. Methods for Determining Shrinkage and Creep Deformations*. Moscow, Gosstroj Publ., 1980. 26 (in Russian).
12. State Standard 24452–80. *Concrete. Methods for Determining Prismatic Strength, Modulus of Elasticity and Poisson Ratio*. Moscow, Gosstroj Publ., 1980. 20 (in Russian).
13. State Standard 12730.5–84. *Concrete. Methods for Determining Water Resistance*. Moscow, Gosstroj Publ., 1978. 15 (in Russian).
14. State Standard 10060.2–95. *Concrete. Accelerated Methods for Determining Frost Resistance with Repeated Freezing and Thawing*. Moscow, Publishing House of Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, 1996. 8 (in Russian).
15. STB 1544–2005. *Structural Heavyweight Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2005. 36 (in Russian).
16. State Standard 18105–2018. *Concrete. Rules for Control and Assessment of Strength*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 (in Russian).
17. STB EN 206–2016. *Concrete. Requirements, Performance, Manufacture and Compliance*. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 108 (in Russian).
18. SN [Construction Code] 1.03.01–2019. *Construction of Building Structures for Buildings and Structures*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2019. 131 (in Russian).

Поступила 06.04.2021

Подписана в печать 08.06.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. State Standard 31108–2016. *Cements for General Construction. Technical Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 18 (in Russian).
2. STB EN 197-1–2015. *Cement. Part 1. Composition, Technical Requirements and Conformity Criteria for General Cement*. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 40 (in Russian).
3. STB 1311–2002. *Cuboid Crushed Stone from Dense Rocks. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2002. 24 (in Russian).
4. State Standard 8267–93. *Crushed Stone and Gravel from Dense Rocks for Construction Work. Technical Specifications*. Moscow, Gosstroj Publ., 1995. 11 (in Russian).

Received: 06.04.2021

Accepted: 08.06.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-338-344>

УДК 629.7

Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата

Докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый¹⁾,
аспиранты А. Ю. Бумай¹⁾, С. С. Прохорович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Решается задача аналитического синтеза управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата (БЛА) при его полете по сложной траектории, состоящей из последовательно расположенных участков горизонтального полета, находящихся на разной высоте относительно земной поверхности. Задача решается как аналитическое определение оптимального управления линейной нестационарной системой при заданном минимизируемом функционале качества. Математическая модель системы представляется в виде дифференциальных уравнений движения БЛА в вертикальной плоскости неподвижной системы координат, привязанной к земной поверхности. Особенностью предлагаемой методики решения задачи является обоснование оригинального вида минимизируемого функционала и параметров, входящих в полученный известными методами закон изменения управляющего ускорения. В формате составляющих функционала качества рассматриваются значения координат и скорости беспилотного летательного аппарата, заданных в соответствующих точках пространства, через которые должен проходить путь аппарата, для получения оптимальной кривизны траектории. Вычисленные математические зависимости позволяют реализовать их на борту летательного аппарата и, в конечном итоге, решают задачу обеспечения минимальных затрат энергии при управлении объектом (БЛА). Компьютерное моделирование аналитически полученных результатов в виде траектории полета беспилотного летательного аппарата и процессов изменения его ускорения и скорости показало работоспособность предлагаемой методики и перспективность ее использования на первоначальном этапе синтеза системы управления БЛА.

Ключевые слова: синтез закона управления, беспилотный летательный аппарат, центр масс, траектория полета, минимизирующий функционал, ускорение, математическое моделирование

Для цитирования: Лобатый, А. А. Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай, С. С. Прохорович // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 338–344. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-338-344>

Analytical Synthesis of Control Acceleration of Unmanned Aerial Vehicle

A. A. Lobaty¹⁾, A. Y. Bumai¹⁾, S. S. Prohorovich¹⁾

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

Abstract. The problem of analytical synthesis of the control acceleration for an unmanned aerial vehicle (UAV) during its flight along a complex trajectory, consisting of sequentially located horizontal flight sections, located at different heights

Адрес для переписки

Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/3,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 266-26-61
lobaty@bntu.by

Address for correspondence

Lobaty Aleksandr A.
Belarusian National Technical University
25/3, F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 266-26-61
lobaty@bntu.by

relative to the earth's surface has been solved in the paper. The problem has been solved as an analytical definition of the optimal control of a linear non-stationary system for a specified minimized quality functional. The mathematical model of the system is presented in the form of differential equations of UAV motion in the vertical plane of a fixed coordinate system related to the earth's surface. A feature of the proposed methodology for solving the problem is the substantiation of the original form of the minimized functional and parameters included in the law of variation of the control acceleration obtained by known methods. As the components of the quality functional, the values of coordinates and velocity of the UAV are considered and they are specified at the corresponding points in space through which the UAV path must pass, in order to obtain the optimal curvature of the trajectory. The derived mathematical dependences make it possible to implement them on board of an aircraft and, ultimately, solve the problem of ensuring the minimum energy consumption when controlling an object (UAV). Computer simulation of the analytically obtained results in the form of the UAV flight trajectory and the processes of changing its acceleration and speed have shown the efficiency of the proposed technique and the prospects of its use at the initial stage of the synthesis of the UAV control system.

Keywords: synthesis of the control law, unmanned aerial vehicle, center of mass, flight trajectory, minimized functional, acceleration, mathematical modeling

For citation: Lobaty A. A., Bumai A. Y., Prohorovith S. S. (2021) Analytical Synthesis of Control Acceleration of Unmanned Aerial Vehicle. *Science and Technique*. 20 (4), 338–344. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-338-344> (in Russian)

Введение

Робототехнические мехатронные самодвижущиеся системы, обладающие элементами искусственного интеллекта, занимают широкую сферу применения в различных областях человеческой деятельности. Синтез управления этими системами основан в первую очередь на использовании их математических моделей, поскольку такие системы являются структурно и конструктивно сложными. К настоящему времени создано и внедрено много различных подходов к разработке аналитических методов синтеза управлений данными системами, основанных на использовании математического моделирования. Среди них – как строгие математические методы с точным решением задач оптимизации, так и приближенные инженерные подходы, предназначенные для решения частных задач, различающиеся постановкой задачи и путями ее решения, сложностью создания адекватных математических моделей систем, возможностями разработчиков. Различные подходы к решению задач синтеза систем управления мехатронных систем позволяют наиболее эффективно использовать преимущества каждого из них.

Рассмотрим задачу синтеза системы управления беспилотного летательного аппарата (БЛА) при его полете по сложной траектории. БЛА имеют широкое распространение, разное предназначение и соответственно различные конструктивное исполнение и способы применения. Среди сфер использования БЛА наиболее распространенные – способы монито-

ринга земной поверхности и объектов, находящихся на ней. Без применения БЛА в наше время уже трудно представить решение задач картографии и геодезии, мониторинга труднодоступных районов, лесов, полей во всевозможных спектральных диапазонах с различных ракурсов. Не говоря уже об использовании БЛА в чрезвычайных ситуациях, в военной сфере и т. д.

Математические модели применения БЛА включают в себя большое число математических выражений, которые описывают перемещения БЛА как твердого тела в пространстве, включающие уравнения кинематики и динамики движения центра масс и относительно центра масс [1, 2]. Здесь должны присутствовать модели атмосферы, включающие ее турбулентность, математические выражения, описывающие физические процессы, происходящие в различных системах и элементах БЛА. Математически моделируются происходящие в системах БЛА механические и электрические процессы. Кроме того, в математических моделях функционирования систем БЛА могут присутствовать модели, описывающие газодинамику, пневматику, гидравлику. Значительную часть математических моделей систем управления БЛА занимает моделирование радиотехнических систем и их элементов.

В связи с большой сложностью математического описания всех элементов БЛА синтез управления БЛА необходимо производить поэтапно, начиная с решения наиболее общей задачи и последовательно переходя к решению частных задач.

Синтез траекторного управления беспилотным летательным аппаратом

Эволюция изменения вектора параметров $X(t)$, описывающих полет БЛА в пространстве, в общем случае представляется векторным уравнением вида [3]

$$\dot{X}(t) = f(X, t); \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $f(X, t)$ – нелинейная векторная функция; t – текущее время, независимая переменная.

Для исследования полета БЛА по заданной траектории необходимо иметь математическую модель соответствующей траектории. В связи с тем, что в процессе полета в большинстве случаев не предусмотрено энергичное маневрирование БЛА и параметры его движения при этом не достигают наложенных на них ограничений, используя различные методы линеаризации относительно опорной траектории, математическую модель движения БЛА в пространстве состояний можно описать линейным векторно-матричным дифференциальным уравнением

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t); \quad X(t_0) = X_0, \quad (2)$$

где $U(t)$ – вектор управлений; $A(t)$, $B(t)$ – матрица переменных коэффициентов.

При решении задач синтеза управления БЛА, как правило, рассматривается задача Больца, в которой минимизируемый функционал качества представляется в виде квадратичного функционала Летова – Калмана [3]

$$J = X_k^T R X_k + \int_{t_0}^{t_k} [X(t)^T Q(t) X(t) + U(t)^T S(t) U(t)] dt, \quad (3)$$

где $X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k]^T$ – вектор, включающий минимальные отклонения (промах) БЛА относительно промежуточной k -й точки маршрута; $X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ – то же текущих координат центра масс БЛА в заданной системе координат; $U(t) = [a_x(t), a_y(t), a_z(t)]^T$ – то же управлений, состоящий из нормальных ускорений центра масс БЛА в этой системе координат.

Рассмотрение линейного квадратичного функционала качества (3) и линейной модели эволюции системы (2) существенно упрощает задачу синтеза. В этом случае имеет место так

называемая задача аналитического конструирования оптимального регулятора, в которой искомый вектор оптимального управления определяется из выражения [3, 4]

$$U^*(t) = -S^{-1}(t)B^T(t)K(t)X(t), \quad (4)$$

где $K(t)$ – матрица коэффициентов, вычисляемая путем решения векторного дифференциального уравнения типа Риккати

$$\dot{K}(t) = -A^T(t)K(t) - K(t)A(t) + K(t)B(t)S^{-1}(t)B^T(t)K(t) - Q(t); \quad K(t_k) = R. \quad (5)$$

Основная проблема, возникающая в этом случае при определении оптимального управления $U^*(t)$, заключается в решении так называемой двухточечной краевой задачи, которая предполагает одновременное решение системы дифференциальных уравнений (2) и (5). При этом у системы (2) заданы начальные условия, а у (5) – конечные. Аналитическое решение данной задачи возможно лишь в некоторых случаях для систем малой размерности. В остальном же для решения двухточечной задачи обычно применяется метод прогонки, при котором в начальный момент времени задаются приближенные крайние значения для одной из систем – (2) или (5), а затем многократно интегрируются (2) и (5) в «прямом» и «обратном» времени до достижения в каждом конкретном случае необходимой точности получения результата.

Синтез закона управления траекторией БЛА (как и любого летательного аппарата) заключается в формировании закона изменения вектора скорости БЛА $\vec{v}$ как по направлению, так в ряде случаев и по величине. В соответствии с существующими законами механики при известной массе БЛА задача сводится к определению потребного вектора ускорения центра масс БЛА, который приводит к изменению вектора $\vec{v}$ и, соответственно, к изменению траектории полета БЛА. При этом рассматриваются математические выражения, описывающие кинематику и динамику движения БЛА как точки в пространстве с учетом рассмотрения соответствующих систем координат.

При моделировании траектории полета БЛА рассматривается его движение в прямоугольной неподвижной системе координат, привязанной к земной поверхности. За начало этой

системы координат обычно принимается точка старта БЛА (стартовая система координат $OXYZ$) [5]. Параметры траектории полета БЛА описываются вектором, характеризующим положение центра масс БЛА в этой системе координат $X^T(t) = [x \ y \ z]$, связанного с вектором скоростей и вектором ускорений в данной системе координат соответствующими векторными дифференциальными уравнениями: $\dot{X}(t) = v(t)$, $\dot{v}(t) = a(t)$, где $v^T(t) = [v_x \ v_y \ v_z]$, $a^T(t) = [a_x \ a_y \ a_z]$. При заданной траектории полета БЛА задача управления им состоит в определении вектора управляющих ускорений БЛА $a_y^T(t) = [a_{yx} \ a_{yy} \ a_{yz}]$, приложенного к центру масс аппарата.

Рассмотрим широко распространенную задачу изменения траектории полета БЛА в вертикальной плоскости. Она может иметь место в ситуации, когда БЛА осуществляет полет на большой высоте, затем снижается для выполнения задачи и опять набирает высоту, необходимую для предотвращения столкновения с наземными объектами. На рис. 1 представлен общий вид траектории полета БЛА по заданному маршруту.

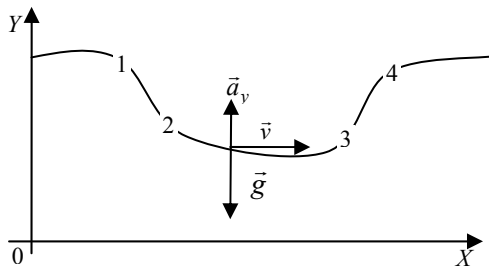


Рис. 1. Траектория полета беспилотного летательного аппарата: 1, 2, 3, 4 – точки начала и окончания соответствующих участков изменения траектории; $\vec{v}$ – вектор скорости; $\vec{a}_y$ – вектор вертикального управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата; $\vec{g}$ – вектор гравитационного ускорения

Fig. 1. Unmanned aerial vehicle flight trajectory: 1, 2, 3, 4 – start and end points of corresponding sections of trajectory change; $\vec{v}$ – velocity vector; $\vec{a}_y$ – vector of vertical steering acceleration of unmanned aerial vehicle; $\vec{g}$ – gravitational acceleration vector

На рис. 1 принято, что БЛА осуществляет полет с постоянной скоростью $|\vec{v}| = \text{const}$.

В [6, 7] рассматривается решение аналогичной задачи при полете БЛА через заданные

точки пространства. Однако в этом случае задача несколько проще, так как не накладываются жесткие требования к изменению вектора скорости $\vec{v}$. На каждом из заданных участков полета БЛА система дифференциальных уравнений движения аппарата имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v_x, \quad x_0(0) = x_0; \\ \dot{y} &= v_y, \quad y_g(0) = y_0; \\ \dot{v}_x &= a_x, \quad v_x(0) = v_{x0}; \\ \dot{v}_y &= a_y, \quad v_y(0) = v_{y0}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где x, y – координата центра масс БЛА в инерциальной системе координат; v_x, v_y – проекция вектора скорости $\vec{v}$ БЛА на оси этой системы координат; a_x, a_y – ускорение центра масс БЛА.

В качестве параметра управления БЛА в данном случае рассматривается вертикальное ускорение аппарата $a_y(t)$. В (6) допускается, что $v_x = \sqrt{v^2 - (v_y)^2}$, где принято, что скорость БЛА $v = |\vec{v}|$, т. е. в процессе полета аппарата его скорость не изменяется.

Определим оптимальное управление БЛА (ускорение $a_y(t)$) на каждом из участков траектории его полета. Важнейшую определяющую роль при синтезе оптимального управления играют правильные обоснование и формализация минимизируемого функционала качества. В данном случае в качестве критерия оптимизации будем рассматривать традиционный для этого типа задач квадратичный функционал [1, 6, 8]:

$$J = \frac{1}{2} \left[c_1 (v_y - v_{y\text{задан}})^2 + c_2 (y - y_{\text{задан}})^2 \right]_{t=t_k} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} (a_y)^2 dt, \quad (7)$$

где t_k – момент времени, при котором БЛА достигает заданной очередной точки пространства; $v_{y\text{задан}}$ – заданное значение проекции скорости БЛА на вертикальную ось y соответствующей инерциальной (стартовой) системы координат в момент t_k ; $y_{\text{задан}}$ – вертикальная координата заданной точки траектории полета БЛА в момент t_k ; c_1, c_2 – коэффициенты, кото-

рый задается с учетом размерности переменных, входящих в (6).

В отличие от задачи, решаемой в [6], в (7) $v_{y\text{задан}} = 0$, что соответствует горизонтальному полету БЛА после окончания маневрирования (изменения траектории) на соответствующем участке траектории.

Решение задачи минимизации функционала (7) при наличии ограничений, накладываемых на траекторию в виде (6), было получено в [8, 9] на основе применения методов вариационного исчисления. В дальнейшем для различных форм постановки задачи данное решение получило развитие в [1, 6]. Для задач (6), (7) проекция оптимального ускорения центра масс БЛА на ось y определяется следующими выражениями:

$$a_y(v_y, y, t) = -\Lambda_v(t)[v_y(t) - v_{y\text{задан}}] - \Lambda_y(t)[y(t) - y_{y\text{задан}}] + g; \quad (8)$$

$$\Lambda_v(t) = \frac{(1/c_2) + (1/c_1)(t_k - t)^2 + 1/3(t_k - t)^3}{D(t_k - t)}; \quad (9)$$

$$\Lambda_y(t) = \frac{(1/c_1)(t_k - t) + 1/2(t_k - t)^2}{D(t_k - t)}; \quad (10)$$

$$D(t_k - t) = \left[\frac{1}{c_2} + \frac{1}{3}(t_k - t)^3 \right] \times \left[\frac{1}{c_1} + t_k - t \right] - \frac{1}{4}(t_k - t)^4, \quad (11)$$

где $t_k - t = t_{\text{ост}}$ – время, необходимое для достижения БЛА очередной заданной точки пространства,

$$t_{\text{ост}} = \frac{D}{|\dot{D}|}; \quad (12)$$

D – текущая дальность от центра масс БЛА до заданной точки пространства на соответствующем интервале наведения; $|\dot{D}|$ – модуль скорости сближения БЛА с очередной заданной точкой.

В (9)–(11) присутствуют неизвестные коэффициенты c_1 , c_2 , которые определяют относительную значимость входящих в функцио-

нал (7) переменных и выполняют роль нормировочных коэффициентов. Так как общего теоретического подхода для их получения нет, они выбираются исходя из конкретной постановки задачи; в некоторых случаях могут задаваться исходя из максимально допустимых значений величин переменных, перед которыми они стоят. В рассматриваемом случае: $c_1 = 1/(v_{y\text{max}})^2$; $c_2 = 1/(y_{\text{max}})^2$. Однако следует заметить, что выбор $v_{y\text{max}}$ и y_{max} также требует соответствующего обоснования. Оригинальное решение представлено в [8], где предлагается считать, что $c_1 \rightarrow \infty$ и $c_2 \rightarrow \infty$. Это означает, что терминальные составляющие функционала (7) значимее интегральной составляющей, которая характеризует минимизацию перегрузки. Данное допущение справедливо, когда БЛА обладает достаточным запасом топлива на всей траектории полета при относительно небольшой скорости полета в отличие, например, от управляемой ракеты, у которой значительные боковые перегрузки при ограниченном запасе топлива приводят к существенной потере скорости и, следовательно, к потере управляемости на конечном участке траектории полета. В этом случае выражение для оптимальной перегрузки БЛА (8) принимает достаточно простой вид

$$a_{yg} = -\frac{4v_{yg}}{t_{\text{ост}}} - \frac{6(y_g - y_{g\text{задан}})}{(t_{\text{ост}})^2} + g. \quad (13)$$

Необходимо принять во внимание, что в законе управления (13) присутствует переменная $t_{\text{ост}}$, которая в соответствии с (12) стремится к нулю. Поэтому при практической реализации закона управления (13) предлагается представлять формулу (12) в следующем виде:

$$t_{\text{ост}} = \frac{D + D_{\text{ост}}}{|\dot{D}|}, \quad (14)$$

где $D_{\text{ост}}$ – остаточная дальность до окончания полета БЛА в заданную точку пространства, в случае достижения которой при дальнейшем неуправляемом полете по прямой точность наведения БЛА в заданную точку является приемлемой.

Применение в законе управления выражения (14) вместо (12) позволяет избавиться от нежелательного деления на ноль в (13).

В качестве примера рассмотрено математическое моделирование данной задачи в среде Mathcad при следующих заданных значениях: $v = 50 \text{ м/с} = \text{const}$; $D_{\text{ост}} = 50 \text{ м}$. В соответствии с обозначениями, приведенными на рис. 2, заданы координаты точек, через которые должен пролететь БЛА: $x_1 = 0 \text{ м}$, $y_1 = 500 \text{ м}$; $x_2 = 850 \text{ м}$, $y_2 = 200 \text{ м}$; $x_3 = 1700 \text{ м}$, $y_3 = 200 \text{ м}$; $x_4 = 2550 \text{ м}$, $y_4 = 500 \text{ м}$. На рис. 2 представлена траектория БЛА, полученная в результате компьютерного моделирования.

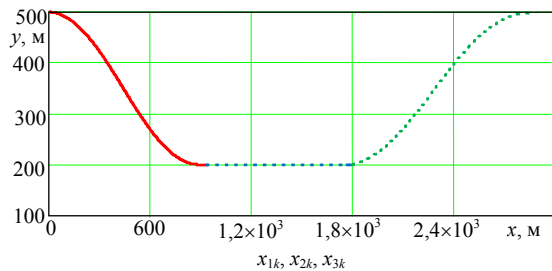


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования траектории полета беспилотного летательного аппарата:

— $-y_{1k}$; — $-y_{2k}$; — $-y_{3k}$
 Fig. 2. Results of computer simulation of unmanned aerial vehicle flight trajectory:
 — $-y_{1k}$; — $-y_{2k}$; — $-y_{3k}$

На рис. 3 представлены графики изменения управляющей вертикальной перегрузки $a_y(t)$ и вертикальной скорости $v_y(t)$ БЛА на трех приведенных на рис. 2 участках траектории полета. Как показали результаты моделирования данного примера, величины отклонений траектории БЛА от заданных промежуточных точек пространства не превышают 5 м, что вполне приемлемо. При этом величина управляющей перегрузки $n_y(t) = a_y(t)/g$ не превышает предельно допустимых значений.

Данный подход в определении управляющей перегрузки БЛА применим и для решения пространственной задачи наведения БЛА. Это может производиться отдельным решением двух плоских задач с последующим их объединением или решением задачи в новой введенной вращающейся системе координат, связанной с вектором дальности БЛА до очередной точки пространства с последующим разделением по каналам управления БЛА с помощью матрицы преобразования координат (матрицы направляющих косинусов) [5, 10].

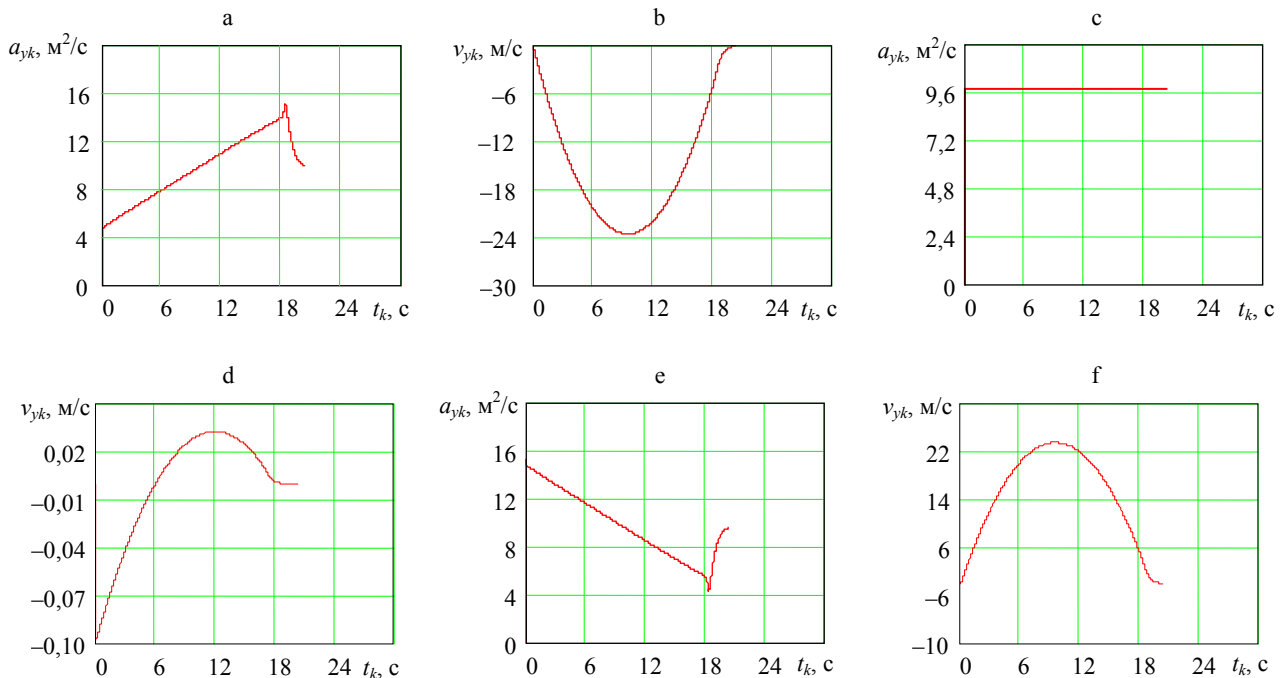


Рис. 3. Изменения вертикальной перегрузки a_{yk} и вертикальной скорости v_{yk} на траектории полета:
 а, б – на участке 1; в, д – на участке 2; е, ф – на участке 3

Fig. 3. Changes in vertical overload a_{yk} and vertical velocity v_{yk} of flight path:
 а, б – in section 1; в, д – in section 2; е, ф – in section 3

ВЫВОДЫ

1. Полученный закон изменения управляющей перегрузки $a_y(t)$ является основой для формирования структуры построения автопилота беспилотного летательного аппарата в виде закона изменения угла отклонения рулевой поверхности (рулей по каждому каналу управления) в виде $\delta_y = f(a_y, p_i, t)$ (где $p_i = p_i(t)$ – измеряемый датчиками беспилотного летательного аппарата параметр, характеризующий его пространственное перемещение). В зависимости от вида математических моделей, описывающих пространственное перемещение беспилотного летательного аппарата, в том числе и относительно центра масс, могут применяться различные известные методы синтеза регуляторов систем управления.

2. Поскольку невозможно абсолютно точно описать математически все процессы, протекающие в беспилотном летательном аппарате и влияющие на его состояние, на последнем этапе синтеза системы управления таким аппаратом, как и любой другой сложной технической системой, приходится производить коррекцию параметров автопилота (параметрическую оптимизацию) под конкретную конструкцию беспилотного летательного аппарата и конкретные условия его применения.

3. Представленная методика синтеза закона изменения управляющей перегрузки беспилотного летательного аппарата $a_y(t)$ является основой для последующего поэтапного синтеза системы управления аппаратом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2009. 556 с.
2. Моисеев, В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. 768 с.
3. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. 616 с.
5. Дмитриевский, А. А. Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
6. Лобатый, А. А. Интервально-оптимальное программное управление летательным аппаратом / А. А. Лобатый, М. А. Аль-Машхадани // Наука и техника. 2014. № 1. С. 25–29.
7. Лобатый, А. А. Формирование оптимальных параметров траектории полета беспилотного летательного ап-

парата через заданные точки пространства / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай, Ду Цзюнь // Доклады БГУИР. 2019. № 7–8. С. 50–57. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-50-57>.

8. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. М.: Мир, 1972. 544 с.
9. Лобатый, А. А. Аналитический синтез управления беспилотным летательным аппаратом / А. А. Лобатый, А. А. Антаневич, Ю. Ф. Икуас // Сборник статей Военной академии Республики Беларусь. 2009. № 17. С. 62–66.
10. Красовский, А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский, Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. М.: Военно-воздушная инженерная академия имени Н. Е. Жуковского, 1986. 477 с.

Поступила 28.01.2021

Подписана в печать 16.03.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Veremeenko K. K., Zheltov S. Yu., Kim N. V., Sebyakov G. G., Krasil'shchikov M. N. (2009) *Modern Information Technologies in the Tasks of Navigation and Guidance of Unmanned Maneuverable Aerial Vehicles*. Moscow, Fizmatlit Publ. 556 (in Russian).
2. Moiseev V. S. (2013) *Applied Theory of Control of Unmanned Aerial Vehicles*. Kazan, State Budgetary Institution "Republican Center of Education Quality Monitoring". 768 (in Russian).
3. Krasovskii A. A. (ed.) (1987) *Handbook on Automatic Control Theory*. Moscow, Nauka Publ. 712 (in Russian).
4. Pupkov K. A., Egupov N. D., Barkin A. I., Zaitsev A. V., Kanushkin S. V., Komartsova L. G., Korlyakova M. O., Kornyshev Yu. P., Krasnoshechenko V. I., Kurdyukov A. P., Maksimov A. V., Mel'nikov D. V., Myshlyayev Yu. I., Pilishkin V. N., Rybin V. M., Utrobin G. F., Faldin N. V., Filimonov N. B. (2004) *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. Vol. 3. Synthesis of Regulators of Automatic Control Systems*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 616 (in Russian).
5. Dmitrievskii A. A., Lysenko L. N. (2005) *External Ballistics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 608 (in Russian).
6. Lobaty A. A., Al-Mashkhadani M. A. (2014) Interval Optimal Software Control of the Aircraft. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 25–29 (in Russian).
7. Lobaty A. A., Bumai A. Yu., Du Jun (2019) Formation of Optimal Parameters of the Trajectory of the Overflight of Unmanned Aerial Vehicle through Specified Points of Space. *Doklady BGUIR*, (7–8), 50–57. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-50-57> (in Russian).
8. Bryson A., Yu-Chi Ho (1975) *Applied Optimal Control Theory*. CRC Press. 482.
9. Lobaty A. A., Antanovich A. A., Ikuas Yu. F. (2009) Analytical Synthesis of Control System of Unmanned Aerial Vehicle. *Sbornik Statey Voennoy Akademii Respubliki Belarus* [Collected Papers of the Military Academy of the Republic of Belarus], (17), 62–66 (in Russian).
10. Krasovskii A. A., Vavilov Yu. A., Suchkov A. I. (1986) *Automatic Flight Control Systems*. Moscow, Zhukovsky Air Force Engineering Academy. 477 (in Russian).

Received: 28.01.2021

Accepted: 16.03.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-345-351>

УДК 629.3; 004.42

Использование искусственных нейронных сетей для определения износа композиционного фрикционного материала

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Лешок¹⁾, Ю. Б. Попова²⁾

¹⁾Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Спеченные фрикционные материалы широко используются в узлах трения автотракторной техники, техники специального назначения. Основная цель – передача крутящего момента на исполнительный механизм. Развитие рынка техники требует разработки и применения новых узлов. Одновременно с этим необходимо создание новых материалов, это относится и к спеченным фрикционным. Данная группа материалов характеризуется высоким ресурсом работы, эффективностью передачи крутящего момента, а также способностью восстановления работоспособности в случае нарушения режимов эксплуатации. Одним из наиболее существенных параметров, характеризующих спеченный фрикционный материал, является износостойкость. В большинстве случаев она определяет не только ресурс работы самого узла, но и всей машины в целом. Особое место занимают тормозные узлы, в которых также используются фрикционные материалы. Повышенная износостойкость фрикционного материала способствует снижению эффективности и ресурса работы тормозной системы. Оценка износостойкости фрикционного материала под заданные эксплуатационные параметры – весьма длительный и материально затратный процесс. Разработка методов и способов ускорения оценки износостойкости – важная научная и практическая задача. В статье представлены результаты использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования ресурса работы композиционного фрикционного материала на основе меди в зависимости от скорости скольжения, давления на материал и количества подаваемой смазки в зону трения. С использованием массива экспериментальных данных для фрикционного материала ФМ-15 была обучена искусственная нейронная сеть. Результаты обучения показали высокую точность, правильность предложенной и реализованной архитектуры сети. Разработанное программное обеспечение продемонстрировало свою работоспособность и возможность применения в расчетах для определения износа композиционного фрикционного материала.

Ключевые слова: фрикционный материал, коэффициент трения, износ, ресурс работы, искусственные нейронные сети

Для цитирования: Лешок, А. В. Использование искусственных нейронных сетей для определения износа композиционного фрикционного материала / А. В. Лешок, Ю. Б. Попова // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 345–351. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-345-351>

Using Artificial Neural Networks to Determine Wear of Composite Friction Material

A. V. Liashok¹⁾, Yu. B. Popova²⁾

¹⁾The State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute” (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. Sintered friction materials are widely used in friction units of automotive vehicles and special purpose vehicles. The main purpose is to transmit torque to the actuator. The development of the technology market requires the development and use of new units. At the same time, the creation of new materials is required, which also applies to sintered friction

Адрес для переписки

Попова Юлия Борисовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

Address for correspondence

Popova Yuliya B.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

materials. This group of materials is characterized by a high service life, efficiency of torque transmission, as well as the ability to restore performance in case of violation of operating modes. One of the most significant parameters characterizing a sintered friction material is wear resistance. In most cases, it determines not only the resource of the unit itself, but the entire machine as a whole. A special place is occupied by brake units, which also use friction materials. The increased wear resistance of the friction material contributes to a decrease in the efficiency and service life of the brake system. Evaluation of the wear resistance of a friction material for the given operational parameters is a very long and costly process. The development of methodology and methods for accelerating the assessment of wear resistance is an important scientific and practical task. The paper presents the results of using artificial neural networks to predict the service life of a composite friction material based on copper on the sliding speed, pressure on the material and the amount of lubricant supplied to the friction zone. An artificial neural network has been trained using an array of experimental data for the FM-15 friction material. The training results have shown high accuracy, correctness of the proposed and implemented network architecture. The developed software has demonstrated its efficiency and the possibility of using it in calculations to determine the wear of a composite friction material.

Keywords: friction material, coefficient of friction, wear, service life, artificial neural networks

For citation: Liashok A. V., Popova Yu. B. (2021) Using Artificial Neural Networks to Determine Wear of Composite Friction Material. *Science and Technique*. 20 (4), 345–351. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-345-351> (in Russian)

Быстрое развитие современной техники вызвало необходимость применения форсированных режимов работы узлов трения машин. Одновременно ставится вопрос о переходе на серийное производство машин без длительных натурно-производственных испытаний. Все это повышает требования к промежуточным ресурсным испытаниям триботехнических материалов и узлов трения. В то же время традиционный «ручной» однофакторный анализ при оценке результатов эксперимента нередко приводит к тому, что характеристики, полученные в лабораторном эксперименте, не могут быть воспроизведены при натурно-производственных испытаниях.

Долговечность и работоспособность узлов и механизмов определяются совокупностью факторов, один из которых – их предельное состояние [1]. В [1] также отмечается, что характеристикой предельного состояния является наработка, представляющая собой календарную продолжительность эксплуатации изделия до момента возникновения предельного состояния.

При использовании инновационной системы определения ресурса и обеспечения конкурентоспособности триботехнических систем задача сводится к оценке результатов экспериментальных исследований или существующей математической модели объекта. Все триботехнические системы находятся в состояниях, далеких от равновесия [2]. Это условие касается и триботехнических систем, имеющих свои специфику, законы, особенности, предполагающих индивидуальный подход [3]. В пределах нелинейной неравновесной области необходимо специальное исследование. В ряде случаев состояние оказывается неустойчивым, качественно отличаясь от стационарного. Исследование

подобных систем с учетом их нелинейности позволяет обнаружить новые явления, которые не наблюдаются в линейных (равновесных и слабо неравновесных) системах.

Показатель надежности работы фрикционного материала – износ, определяемый совокупностью параметров трибосистемы и находящийся в областях возможных значений параметров. Допустимые значения износа фрикционного материала регламентируются в [4–6] и являются показателем ресурса его работы.

Износ фрикционного материала определяется совокупностью факторов, таких как: конструкция узла и механизма, а также самого фрикционного диска; нагрузочно-скоростные режимы; эффективность организации граничного трения; цикличность фрикционного взаимодействия. Учет всех факторов весьма сложен. Поэтому ограничиваются несколькими из них. В большинстве случаев – это нагрузочно-скоростные режимы и эффективность организации граничного трения, определяемая количеством подаваемой смазки в зону трения (рис. 1).



Рис. 1. Основные факторы, влияющие на износ фрикционного материала

Fig. 1. Main factors affecting wear of friction material

Многокритериальность, многопараметричность, стохастичность и нелинейность триботехнических систем создают значительные трудности при прогнозировании их поведения. В большинстве случаев оценка износа композиционного фрикционного материала осуществляется экспериментальным путем, который состоит из нескольких этапов: сравнительные стендовые; стендовые, приближенные к натурным. Такие испытания достаточно длительные и предполагают существенные материальные, трудовые и энергетические затраты. В случае изменения одного из факторов в работе фрикционного материала требуется проведение повторных испытаний.

Известны расчетные методы оценки ресурса работы фрикционного материала, например, как в [7]. Метод основан на теоретическом анализе гидродинамических процессов и экспериментальных исследований в многодисковых фрикционных узлах. Износ фрикционного материала оценивается энергетической интенсивностью изнашивания, совокупностью коэффициентов, характеризующих энергетическое состояние в месте контакта и микрогеометрии поверхностей трения. Зависимость не учитыва-

ет эксплуатационных параметров, таких как количество смазки в зоне трения, изменение давления и скорости скольжения.

В [8] приведена методика оценки ресурса работы муфт сцепления, основанная на анализе феноменологической стороны процесса трения и изнашивания с помощью построенной математической модели буксования. Недостаток модели – невозможность ее применения для процессов сухого трения.

Использование компьютерной техники и программного обеспечения для моделирования различного рода процессов позволяет активно применять вероятностный подход при прогнозировании ресурса работы. В наибольшей степени этому условию удовлетворяют искусственные нейронные сети (ИНС). Так, для определения износа фрикционного материала ИНС дают возможность в реальном времени при изменении факторов проводить прогнозирование, не прибегая к стендовым испытаниям (рис. 2), существенно сокращая время и материально-технические ресурсы, а также формировать решение его использования в технически оптимальных узлах трения.

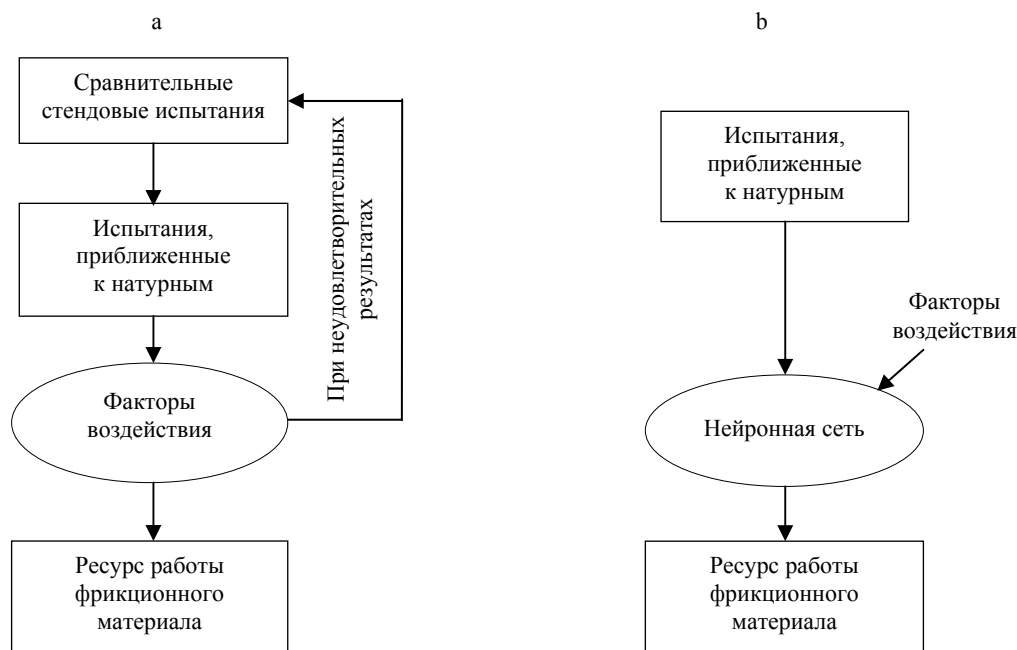


Рис. 2. Схема оценки износа композиционного фрикционного материала: а – традиционная; б – с использованием искусственных нейронных сетей

Fig. 2. Scheme for assessing wear of composite friction material: а – traditional; б – using artificial neural networks

Одним из основных преимуществ ИНС перед традиционными алгоритмами, как указано в [9], является возможность обучения сети на основании массива входных данных. Таким образом, чем больше количественный набор данных, тем качественно выше точность результата. При обучении ИНС входным данным (входам) ставится в соответствие определенный выход с одновременной подстройкой весов. Следует также отметить, что положительными моментами применения ИНС являются относительно простая аппаратная реализация, довольно высокое быстродействие и инвариантность к виду уравнений математической модели системы. То есть разработанные алгоритмы обучения, а также реализованное программное обеспечение могут быть применены для различных видов решаемых задач.

При разработке искусственной нейронной сети определяются с архитектурой ее построения на основании обучающей выборки с учетом двух условий [10]:

1) исходные данные должны быть непротиворечивы, т. е. одному набору входных данных не может соответствовать несколько выходных;

2) набор исходных данных должен быть полным, т. е. количество примеров, предоставляемых алгоритму обучения, должно быть достаточным, чтобы обеспечить его всей необходимой информацией для изучения зависимости.

На рис. 3 предложена архитектура сети для оценки износа композиционного фрикционного материала с тремя входами x_1 (скорость вращения фрикционного диска), x_2 (давление на материал), x_3 (количество подаваемой смазки) и одним выходом y (износ материала).

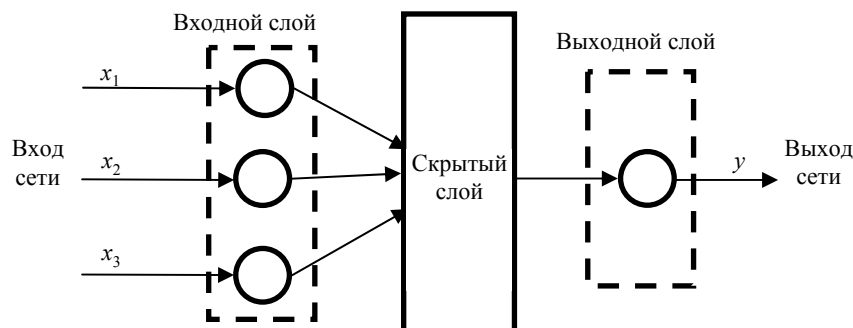


Рис. 3. Графическое представление искусственной нейронной сети для прогнозирования износа фрикционного материала

Fig. 3. Graphical representation of artificial neural network for predicting wear of friction material

В настоящее время существует достаточно большое количество методов обучения ИНС, среди которых наиболее популярен метод обратного распространения ошибки. Он представляет собой итеративный градиентный алгоритм, который используется с целью минимизации ошибки работы многослойной ИНС, получения желаемого выхода и включает в себя три фазы: проведение через сеть обучающего примера (фаза прямого распространения); вычисление значения ошибки между полученным выходом сети и ожидаемым, на основе которого затем рассчитываются ошибки для каждого предыдущего слоя, вплоть до входного (фаза обратного распространения ошибки); единовременная корректировка всех весов, основанная на их текущем значении, величине ошибки, соответствующей рассматриваемому нейрону и активационному значению нейрона [11]. Функция ошибки для сети с J выходами задается следующим образом:

$$E(\bar{x}) = \sum_{j=J} (y_j - t_j)^2, \quad (1)$$

где $\bar{x}$ – набор данных из обучающей выборки; y_j – реальный выход j -го нейрона сети; t_j – ожидаемый выход j -го нейрона.

Для того чтобы ИНС корректно работала, необходимо ее обучить, т. е. определить все веса. Перед началом обучения веса у сети представляются случайным способом. При вычислении выходов нейронов используется сигмоидальная функция активации. На вход функция обучения принимает уже определенные наборы данных (входы-выходы), которые заведомо верные.

На первоначальном этапе идет настройка системы, выставление количества итераций обучения и значения ошибки, которые являются важными показателями в обучении. Если превысить или уменьшить эти показатели, можно переобучить или недоучить систему. Поэтому обычно обучение проводится несколько раз с корректировкой этих параметров. На следующем этапе обучения реализуется проход по сети на основе входных данных для обучения. Результатом прохода являются выходные данные для корректировки весов. При вычислении выходов нейронов используется сигмоидальная функция активации. Затем происходит проход по ИНС в обратном направлении с вычислением значения ошибки, на основе которой в дальнейшем будет выполняться корректировка весов [12]. Значение веса w_{ij} , соответствующее синаптической связи, соединяющей i -й нейрон скрытого слоя с j -м нейроном следующего слоя, изменяется по формуле [13]

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + l e_j z_i, \quad (2)$$

где w_{ij}^{new} , w_{ij}^{old} – новое и старое значения веса при связях, соединяющих i -й нейрон предыдущего слоя и j -й нейрон выходного слоя; l – количество итераций обучения; e_j – значение ошибки каждого нейрона выходного слоя; z_i – выходное значение i -го нейрона.

Для связей, соединяющих входной слой с первым скрытым слоем, (2) примет следующий вид:

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + l e_j x_i, \quad (3)$$

где x_i – i -й компонент входного вектора $\bar{x}$.

При обучении ИНС получает определенный набор весов, которые, если соответствуют ожиданиям, не изменяются, либо происходит корректировка значений допустимой ошибки или итераций обучения, и алгоритм запускается заново. Алгоритм работает до тех пор, пока не будет достигнут приемлемый уровень ошибки или не закончатся все итерации.

Для обучения сети использовались результаты стендовых испытаний влияния нагрузочно-скоростных режимов и количества подаваемой смазки на величину износа композиционного фрикционного материала ФМ-15. Данные были получены после 200 циклов испытаний при следующих режимах: скорость скольжения 1000–2500 м/с, давление на материал 10–25 атм, количество подаваемой смазки 0,5–1,0 л/мин.

Реализация модели прогнозирования износа фрикционного материала осуществлена на языке программирования JavaScript и библиотек Node.js и Underscore.js. В табл. 1 приведены фрагмент данных, используемых для обучения нейросети, результаты расчетов и величина среднеквадратичного отклонения.

Таблица 1

Фрагмент результатов обучения нейросети оценке износа фрикционного материала ФМ-15 и величина среднеквадратичного отклонения

Fragment of results of training neural network for assessing wear of friction material FM-15 and value of mean-square deviation

№	Скорость, м/с	Давление, атм	Количество масла, л/мин	Нормированная величина износа, (мкм/км)/100	Результат расчета, (мкм/км)/100	Среднеквадратичное отклонение
1	2250	15	0,5	0,0028	0,002833	0,000017
2	2250	15	0,6	0,0025	0,002568	0,000034
3	2250	15	0,7	0,0023	0,002333	0,000017
4	2250	15	0,8	0,0021	0,002126	0,000013
5	2250	15	0,9	0,0019	0,001944	0,000022
6	2250	15	1,0	0,0018	0,001783	0,000008
7	2250	16	0,5	0,0027	0,002718	0,000009
8	2250	16	0,6	0,0025	0,002466	0,000017
9	2250	16	0,7	0,0023	0,002244	0,000028
10	2250	16	0,8	0,0021	0,002048	0,000026
11	2250	16	0,9	0,0019	0,001874	0,000013
12	2250	16	1,0	0,0018	0,001721	0,000039
13	2250	17	0,5	0,0026	0,002609	0,000005
14	2250	17	0,6	0,0024	0,002370	0,000015
15	2250	17	0,7	0,0022	0,002159	0,000021
16	2250	17	0,8	0,0020	0,001973	0,000014
17	2250	17	0,9	0,0018	0,001809	0,000005
18	2250	17	1,0	0,0017	0,001663	0,000018

№	Скорость, м/с	Давление, атм	Количество масла, л/мин	Нормированная величина износа, (мкм/км)/100	Результат расчета, (мкм/км)/100	Среднеквадратичное отклонение
19	2250	18	0,5	0,0025	0,002506	0,000003
20	2250	18	0,6	0,0023	0,002279	0,000010
21	2250	18	0,7	0,0021	0,002079	0,000010
22	2250	18	0,8	0,0019	0,001902	0,000001
23	2250	18	0,9	0,0017	0,001746	0,000023
24	2250	18	1,0	0,0016	0,001608	0,000004
25	2250	19	0,5	0,0024	0,002408	0,000004
26	2250	19	0,6	0,0022	0,002193	0,000004
27	2250	19	0,7	0,0020	0,002003	0,000001
28	2250	19	0,8	0,0019	0,001835	0,000032
29	2250	19	0,9	0,0017	0,001687	0,000006
30	2250	19	1,0	0,0015	0,001556	0,000028
31	2250	20	0,5	0,0023	0,002316	0,000008
32	2250	20	0,6	0,0021	0,002112	0,000006
33	2250	20	0,7	0,0020	0,001931	0,000035
34	2250	20	0,8	0,0018	0,001772	0,000014
35	2250	20	0,9	0,0016	0,001631	0,000015
36	2250	20	1,0	0,0013	0,001507	0,000104

Копия экрана разработанного программного обеспечения представлена на рис. 4, где можно заметить, что существуют две возможности расчета износа материала: для определенного режима, задаваемого входными данными x_1 , x_2 , x_3 , и для всей обучающей выборки. Результат расчета приведен для входных данных: $x_1 = 2250$ м/с; $x_2 = 15$ атм; $x_3 = 1,0$ л/мин. При таких данных износ материала составил 0,18 мкм/км.

Расчет износа, мкм/км

Расчет всей обучающей выборки

Рассчитать

Скорость, м/с
2250

Давление, атм
15

Количество масла, л/м
1

Износ = 0,18 мкм/км

Рис. 4. Результат расчета величины износа фрикционного материала ФМ-15 по заданным значениям скорости, давления и количества подаваемой смазки

Fig. 4. Result of calculating wear amount of friction material FM-15 according to specified values of speed, pressure and amount of supplied lubricant

Рис. 5 позволяет оценить точность полученных результатов расчета величины износа композиционного фрикционного материала ФМ-15, полученного экспериментальным и расчетным путем для фрагмента обучающей выборки, приведенной в табл. 1. По оси абсцисс отложены порядковые номера строчек табл. 1, а по оси ординат – износ фрикционного материала ФМ-15, (мкм/км)/100.

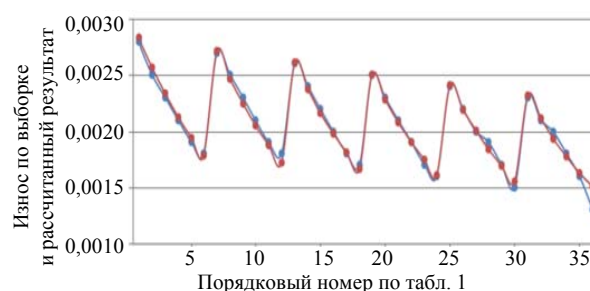


Рис. 5. Расчет износа фрикционного материала ФМ-15 для обучающей выборки по результатам:

— экспериментальным; — обучения нейросети

Fig. 5. Calculation on wear of friction material FM-15 for a training set according to results:

— experimental; — training of neural network

ВЫВОДЫ

1. По полученным результатам можно сделать вывод, что использование искусственных нейронных сетей позволяет прогнозировать ресурс работы композиционного фрикционного материала в зависимости от скорости скольжения, давления на материал и количества подаваемой смазки в зону трения. Это – важный инструмент, снижающий материальные и трудовые ресурсы, исключая длительные стендовые и натурные испытания. Использование искусственных нейронных сетей может являться мощным инструментом в руках специалистов, проектирующих новую технику, позволяя определять габариты узлов и механизмов исходя из их целевого назначения.

2. Результаты расчета показали достаточную точность обучения искусственных нейрон-

ных сетей методом обратного распространения ошибки и доказали правильность предложенной и реализованной архитектуры сети.

3. Разработанное программное обеспечение продемонстрировало свою работоспособность и возможность применения в расчетах для определения износа композиционного фрикционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.002–2015. Введ. 01.03.2017. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
2. Сафонов, Б. П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений / Б. П. Сафонов, А. В. Бегова. Новомосковск: РХТУ имени Д. И. Менделеева, Новомосковский институт, 2004. 59 с.
3. Войтов, В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М. Б. Захарченко // Проблемы трибологии. 2015. № 2. С. 36–44.
4. Изделия фрикционные порошковые. Технические условия: ТУ БУ 100219793.431–2015. Введ. 24.09.2015. Минск: Гос. науч. учр. «Ин-т порошк. метал. имени акад. О. В. Романа», Госстандарт, 2015. 25 с.
5. Ильюшенко, А. Ф. Спеченные металлокерамические фрикционные композиционные материалы и изделия / А. Ф. Ильюшенко, А. А. Дмитриевич, А. В. Лешок // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2011. № 2. С. 10–17.
6. Влияние состава фрикционного материала на основе меди на его структуру и триботехнические свойства / А. В. Лешок [и др.] // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 6. С. 654–660.
7. Юдин, Е. Г. Прогнозирование долговечности фрикционных узлов трансмиссий гусеничных машин / Е. Г. Юдин // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2004. № 3. С. 3–14.
8. Сприжикский, И. А. Оптимизация конструкции и прогнозирование долговечности пар трения муфт сцепления / И. А. Сприжикский. Минск, 1984. 191 с.
9. Шилкин, Н. В. Нейросети: возможности использования алгоритмов самообучения в системах управления теплоэнергопотреблением зданий [Электронный ресурс] / Н. В. Шилкин, М. М. Бродач // АВОВ. 2019. № 4. Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7229. Дата доступа: 10.12.2020.
10. Алтунин, К. А. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22, № 1. С. 122–133.
11. Попов, О. В. Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей / О. В. Попов, Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 6. С. 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477>.
12. Попова, Ю. Б. Программная реализация искусственной нейронной сети для управления виртуальными объектами / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 4. С. 72–78. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2017-4-72-78>.
13. Тархов, Д. А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы / Д. А. Тархов. М.: Радиотехника, 2005. 256 с.

REFERENCES

1. State Standard 27.002–2015. *Reliability in Technology. Terms and Definitions*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 24 (in Russian).
2. Safonov B. P., Begova A. V. (2004) *Engineering Tribology: Assessment of Wear Resistance and Resource of Tribocouplings*. Novomoskovsk, D. I. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk Institute. 59 (in Russian).
3. Voytov V. A., Zakharchenko M. B. (2015) Modeling the Processes of Friction and Wear in Tribosystems under Boundary Lubrication Conditions. Part 2. Simulation Results. *Problemi Tribologii = Problems of Tribology*, (2), 36–44 (in Russian).
4. TU [Technical Specifications] BY 100219793.431–2015. *Powder Friction Products*. Minsk, The State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute Named after O. V. Roman”, Gosstandart Publ., 2015. 25 (in Russian).
5. Ilyushchenko A. Ph., Dmitrovich A. A., Leshok A. V. (2011) Sintered Metal-Ceramic Friction Composite Materials and Products. *Vesti Natsyonal'noi Akademii Navuk Belarusi. Seriya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (2), 10–17 (in Russian).
6. Leshok A. V., Dyachkova L. N., Ilyushchenko A. F., Rogovoy A. N., Alekseenko N. A. (2019) Influence of Copper Frictional Material Composition on Structure and Tribotechnical Properties. *Journal of Friction and Wear*, 40 (6), 495–500. <https://doi.org/10.3103/s1068366619060151>.
7. Yudin E. G. (2004) Prediction on Durability of Friction Units in Transmissions of Tracked Vehicles. *Vestnik MG TU imeni N. E. Bauman = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, (3), 3–14 (in Russian).
8. Sprizhetskii I. A. (1984) *Optimization of Design and Prediction of Durability of Friction Pairs of Clutch Couplings*. Minsk. 191 (in Russian).
9. Shilkin N. V., Brodach M. M. (2019) Neural Networks: Possibilities of Using Self-Learning Algorithms in Control Systems for Heat and Power Consumption of Buildings. *AVOK [AVOK – Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]*, (4). Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7229 (Accessed 10 December 2020) (in Russian).
10. Altunin K. A., Sokolov M. V. (2016) Application of Neural Networks for Modeling the Turning Process. *Vestnik TGTU [Bulletin of Tambov State Technical University]*, 22 (1), 122–133 (in Russian).
11. Popov O. V., Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2018) Determination of Limiting Resistance for Dilatant Soil to Shearing while Using Artificial Neural Networks. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (6), 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477> (in Russian).
12. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Software Implementation of an Artificial Neural Network for Managing Virtual Objects. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (4), 72–78. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2017-4-72-78> (in Russian).
13. Tarkhov D. A. (2005) *Neural Networks. Models and Algorithms*. Moscow, Radiotekhnika Publ. 256 (in Russian).

Поступила 16.12.2020

Подписана в печать 23.02.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

Received: 16.12.2020

Accepted: 23.02.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356>

УДК 332.1

Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть¹⁾, канд. техн. наук, доц. П. В. Попов²⁾,
канд. экон. наук П. И. Лапковская¹⁾, Н. Е. Шевелева²⁾

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

²⁾Волжский филиал Волгоградского государственного университета
(Волгоград, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрен алгоритм решения задачи поиска оптимальной дислокации ключевых объектов транспортной и складской инфраструктур в рамках методологического подхода проектирования логистической инфраструктуры на территории регионов стран. Методологический подход включает в себя три этапа. На первом этапе определяются районы, где целесообразно размещение ключевых объектов региональной логистической инфраструктуры. Далее с использованием разработанных авторами моделей, осуществляется привязка объектов складской инфраструктуры на местности и с учетом спроектированной складской сети определяется оптимальная дислокация объектов транспортной инфраструктуры. Для поиска оптимальных мест расположения объектов региональной логистической инфраструктуры авторы предлагают алгоритм, применимый для построения как складской, так и транспортной инфраструктур вследствие схожести моделей. Алгоритм основан на методе построения последовательности планов. На первоначальном этапе для рассматриваемого множества планов строится конечное расширение. Для данного множества определяется миноранта для функции затрат, связанных с размещением и обслуживанием объектов инфраструктуры, перемещением грузов и перегонем порожнего транспортного средства. После этого формируется итеративный алгоритм, определяющий последовательность оптимумов миноранты на последовательности вложенных друг в друга множеств. На первом шаге находится элемент множества планов, минимизирующий миноранту, на следующем шаге из рассматриваемого множества исключается найденный элемент и на оставшемся множестве ищется новый оптимум, для которого миноранта принимает минимальное значение. Для элиминации множества планов целесообразно использовать процедуры динамического программирования. Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение множества планов размещения объектов, подобрать на нем миноранту и построить алгоритм упорядочивания оптимумов.

Ключевые слова: логистическая инфраструктура, метод построения последовательности планов, линейная миноранта, задача оптимизации

Для цитирования: Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 352–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356>

Algorithm for Solving Problem of Designing Regional Logistics Infrastructure

R. B. Ivut¹⁾, P. V. Popov²⁾, P. I. Lapkovskaya¹⁾, N. E. Sheveleva²⁾

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

²⁾Volga Branch of Volgograd State University (Volgograd, Russian Federation)

Abstract. The paper considers an algorithm for solving the problem of finding the optimal location of key objects of transport and warehouse infrastructures within the framework of a methodological approach to designing logistics infrastructure

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

in the territory of the region of the countries. The methodological approach includes three stages. At the first stage, areas are determined where it is advisable to locate key objects of the regional logistics infrastructure. Further, using the models developed by the authors, the linking of warehouse infrastructure objects on the ground has been carried out and, taking into account the designed warehouse network, the optimal dislocation of transport infrastructure objects has been determined. To find the optimal locations for the objects for regional logistics infrastructure facilities, the authors propose an algorithm that is applicable both for building warehouse and transport infrastructures due to the similarity of the models. The algorithm is based on the method of constructing a sequence of plans. At the initial stage, the final expansion is constructed for the set of plans under consideration. For a given set, a minorant has been determined for the cost function associated with the placement and maintenance of infrastructure facilities, the movement of goods, and the haul of an empty vehicle. After that, an iterative algorithm has been formed that determines the sequence of optima of the minorant on a sequence of nested sets. At the first step, an element of the set of plans has been found that minimizes the minorant, at the next step, the found element is excluded from the set under consideration, and a new optimum is sought on the remaining set for which the minorant takes the minimum value. To eliminate multiple plans, it is advisable to use dynamic programming procedures. The limits of applicability of the method for constructing a sequence of plans are determined by the ability to construct an extension of the set of plans for placing objects, select a minorant on it, and build an algorithm for ordering optima.

Keywords: logistics infrastructure, method of constructing a sequence of plans, linear minorant, optimization problem

For citation: Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Sheveleva N. E. (2021) Algorithm for Solving Problem of Designing Regional Logistics Infrastructure. *Science and Technique*. 20 (4), 352–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356> (in Russian)

Введение

К ключевым факторам, оказывающим существенное влияние на социально-экономическое развитие региона, следует отнести логистическую инфраструктуру, включающую основную (складскую и транспортную) и обеспечивающую (информационную и финансовую) составляющие. Она позволяет не только снизить уровень издержек в сети распределения, поддерживать заданный уровень обслуживания, но и повысить инвестиционную привлекательность региона. В [1] De Prabir показывает, что совершенствование транспортной составляющей логистической инфраструктуры на 10 % приводит к росту экспорта на 2 % и импорта на 3 % соответственно. В исследованиях авторов [2–5] установлена линейная зависимость между социально-экономическими показателями Республики Беларусь, Российской Федерации и региональной логистической инфраструктурой, а в работах Ю. Н. Гольской [6] и Н. А. Росляковой [7] отмечено влияние уровня развития транспортной инфраструктуры на инвестиционную привлекательность регионов.

Значительное внимание логистической инфраструктуре уделяется в программах развития экономики Беларуси и России. Например, в Республиканской программе развития логистической системы и транзитного потенциала [8] отмечено, что совершенствование логистической инфраструктуры страны будет выступать ключевым драйвером ее социально-экономического развития. Инновационный сценарий социально-экономического развития Российской Федерации [9] включает в том чис-

ле и развитие транспортной инфраструктуры для устранения диспропорций в развитии регионов страны, повышения их транзитного потенциала. Таким образом, повышению уровня логистической инфраструктуры регионов уделяется значительное внимание на государственном уровне.

В [10] автором предложен методологический подход построения региональной логистической инфраструктуры. Подход включает в себя три этапа. На первом определяются районы, где целесообразно размещение ключевых объектов транспортной и складской инфраструктур. Для этого предлагается использовать совокупный потенциал метода АВС и кластерного анализа. На втором этапе на основании модели [11] определяются места расположения распределительно-подсортировочных складов. В качестве критерия оптимизации выступает минимум затрат, связанных со строительством и обслуживанием сети складов, грузопереработкой товаров и перемещением грузов. На третьем этапе с помощью модели [12] и с учетом имеющейся сети распределительно-подсортировочных складов определяется оптимальная дислокация ключевых объектов транспортной инфраструктуры.

Для решения поставленных задач оптимизации в статье рассматривается алгоритм, основанный на методе построения последовательности планов и позволяющий определить оптимальное место расположения объектов региональной логистической инфраструктуры, их мощности, вид товароносителя, а также количество транспортных средств для перевозки грузов. Учитывая схожесть моделей, включен-

ных в методологический подход построения региональной логистической инфраструктуры, данный алгоритм может быть применен для проектирования как складской, так и транспортной инфраструктур.

Основная часть

Метод построения последовательности планов представляет собой один из подходов к решению широкого класса задач оптимизации, основанный на составлении последовательности вариантов решения. Идея метода построена на замене исходной задачи оптимизации функции затрат $F(x)$ вспомогательной задачей поиска экстремума некоторой функции $Q(x)$, для которой проще найти оптимальное решение, а также построить и проанализировать упорядоченную в смысле ухудшения значений целевой функции последовательность неоптимальных вариантов.

Пусть задача оптимизации состоит в нахождении такого элемента p^* конечного множества P , на котором достигается минимум функции затрат $F(x)$, определенной на этом множестве. Общая схема решения с изложением основных способов реализации каждого шага выглядит следующим образом:

1) построение для рассматриваемого множества P конечного расширения $R : R \supseteq P$ (множество P является подмножеством R).

Для конструирования множества R можно использовать достаточно очевидный способ. Задачи поиска оптимального размещения объектов логистической инфраструктуры характеризуются наличием ключевых объектов, обладающих конечными наборами их мощностей (ресурсами). Возможные сочетания этих мощностей составляют множество P . Тогда множество R можно составить, предполагая, что каждая из точек обладает одинаковым набором мощностей от минимально возможного уровня, определенного для совокупности предприятий в целом, до максимального. Очевидно, что при таком подходе множество R может полностью совпадать с P ;

2) определение на множестве R некоторой функции $Q(x)$, являющейся минорантой для функции $F(x)$ на множестве P :

$$Q(x) \leq F(x), \forall x \in P.$$

Как правило, основная задача состоит в минимизации суммарных производственно-транс-

портных затрат при заданных условиях производства и потребления. Построение вспомогательной функции (линейной миноранты) основано на двух известных фактах. Первый – сумма или произведение конечного набора элементарных функций определены на том же множестве, что и все слагаемые или сомножители

$$\begin{aligned} Df_1(x) \cap Df_2(x) \cap \dots \cap Df_n(x) = \\ = D[f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)]. \end{aligned}$$

Поэтому чаще всего в качестве вспомогательной функции $Q(x)$ используется аддитивная или мультипликативная функция.

Второй факт – минимум суммарной функции не меньше суммы минимумов функций

$$\begin{aligned} \min_{x \in [a;b]} f_1(x) + \min_{x \in [a;b]} f_2(x) + \dots + \min_{x \in [a;b]} f_n(x) \leq \\ \leq \min_{x \in [a;b]} [f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)]. \end{aligned}$$

Следовательно, в качестве линейной миноранты $Q(x)$ удобно выбирать сумму производственно-транспортных издержек по каждой производственной точке;

3) формирование итеративного алгоритма, определяющего последовательность оптимумов вспомогательной функции $Q(x)$ на последовательности вложенных друг в друга множеств:

$$\forall r_k \in R; Q(r_k) = \min_{x \in [R_k]} Q(x); k \geq 1,$$

$$R_1 = R, R_k = R_{k-1}/r_{k-1} (k = 2, 3, \dots).$$

Суть работы алгоритма упорядочения состоит в следующем: на первом шаге находится элемент множества R , минимизирующий функцию $Q(x)$. На следующем шаге из рассматриваемого множества исключается найденный элемент и на оставшемся множестве ищется новый оптимум, для которого $Q(x)$ принимает минимальное значение. Таким образом, составляется упорядоченная последовательность элементов множества R , которой соответствует неубывание функции $Q(x)$.

Возможны различные способы элиминации элементов множества R . Наиболее эффективным способом упорядочения планов (значений x) является процедура динамического программирования. Если рассматривать минимизацию функции $Q(x) = g_1(x) + g_2(x) + \dots + g_n(x)$

на множестве R векторов $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, удовлетворяющих условиям:

$$\sum_{i=1}^n x_i = b, \quad b > 0, \quad x_i \in \Gamma_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\},$$

$$1 \leq i \leq n, \quad a_{ij} \geq 0, \quad a_{ij} \in Z,$$

то используются следующие функциональные уравнения при:

$$0 \leq z \leq b; \quad k = 1:$$

$$f_1(z) = g_1(z);$$

$$0 \leq z \leq b; \quad 2 \leq k \leq n:$$

$$f_k(z) = \min [g_k(x_k) + f_{k-1}(z - x_k)].$$

После построения последнего функционала $f_n(z)$ выполняется следующий алгоритм.

Шаг 1. Среди множества полученных решений $W_1 = (*, *, \dots, *, a_{in})$ (где a_{in} – значение мощности объекта логистической инфраструктуры последнего объекта; * – условное обозначение комбинаций возможных мощностей оставшихся точек) выбирается такое, которое бы минимизировало функцию $Q(x)$ на рассматриваемом множестве при $r_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$:

$$Q(r_1) = \min_{X \in W_1} Q(X).$$

Шаг 2. Полученное множество решений W_1 преобразуется в новое W_2 по правилу: полученное оптимальное решение предыдущего шага r_1 заменяется на систему решений, включающую в себя значение мощности последнего объекта точки, которое было получено в оптимальном решении предыдущего шага, в комбинации с возможными значениями предпоследней точки (это значения, в которых существует функция $f_2(z)$):

$$W_2 = (*, *, \dots, x_i, x_n^1),$$

$$\forall x_i \in \{x_i / x_i \in \Gamma, x_i \neq x_n^1\}.$$

Таким образом, происходит элиминирование найденного оптимального решения и осуществляется поиск следующего оптимального решения при r_2 :

$$Q(r_2) = \min_{X \in W_2} Q(X).$$

Значение функции при этом ухудшается (числовое значение становится больше).

На последующих шагах производятся аналогичные процедуры, пока не будут выстроены в последовательность решения, соответствующие неубыванию функции $Q(x)$;

4) проверка критерия оптимальности на каждом шаге алгоритма:

$$r_k \in P \Rightarrow F(r_{k-1}) = \min_{X \in R_{k-1} \cap P} F(x),$$

$$r_k \notin P \Rightarrow R_{k-1} \cap P = \emptyset.$$

Если полученная на очередном шаге оптимальная точка принадлежит не только множеству R , но и множеству P , это означает, что можно вычислить значение функции $F(x)$ в этой точке. Если на следующем шаге оказывается, что в следующем найденном оптимальном значении $Q(x)$ превышает значение функции $F(x)$ в предыдущей точке, значит, эта предыдущая точка является решением задачи – оптимальным планом.

Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение R , подобрать на нем миноранту $Q(x)$ и построить алгоритм упорядочивания оптимумов.

ВЫВОД

Представлен алгоритм решения задачи оптимизации региональной логистической инфраструктуры в рамках методологического подхода построения складской и транспортной инфраструктур. Алгоритм основан на методе построения последовательности планов и предполагает замену исходной задачи оптимизации функции затрат вспомогательной задачей поиска экстремума некоторой миноранты, а также возможность построить и проанализировать упорядоченную в смысле ухудшения значений целевой функции последовательность неоптимальных вариантов. Конечность метода (алгоритма решения) следует из условия проверки критерия оптимальности на каждом шаге алгоритма. Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение планов решения задачи, подобрать на нем миноранту и построить алгоритм упорядочивания оптимумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prabir, De. The Importance of Trade Costs: a Gravity Model Applications [Electronic resource] / De Prabir // 3rd ARTNeT Capacity Building Workshop: UNESCAP, Bangkok, 26–30 March 2007. Access mode: http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3_d2s3dea.pdf. Date of access: 20.12.2020.
2. Ивуть, Р. Б. Оценка влияния транспортно-логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь на ее социально-экономические показатели / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100>.
3. Попов, П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на социальные показатели Российской Федерации / П. В. Попов // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 10. С. 35–44.
4. Попов, П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на экономические показатели Российской Федерации / П. В. Попов // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 12. С. 19–35.
5. Попов, П. В. Оценка влияния логистической инфраструктуры на социально-экономические показатели Астраханской области / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Логистика. 2019. Т. 146, № 1. С. 46–50.
6. Гольская, Ю. Н. Оценка влияния транспорта на социально-экономическое развитие регионов / Ю. Н. Гольская, И. А. Кузнецова // Известия Байкальского государственного университета. 2010. № 5. С. 61–64.
7. Рослякова, Н. А. Оценка взаимосвязи параметров транспортного комплекса региона и его экономического роста / Н. А. Рослякова // Вестник СибАДИ. 2013. Т. 33, № 5. С. 156–162.
8. Об утверждении Республиканской программы развития логистической системы и транзитного потенциала на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 18 июля 2016 г. № 560 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/C21600560_1469134800.pdf. Дата доступа: 27.12.2020.
9. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (ред. от 28.09.2018) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/. Дата доступа: 27.12.2020.
10. Попов, П. В. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Экономика региона. 2019. Т. 15, вып. 2. С. 483–492. <https://doi.org/10.17059/2019-2-13>.
11. Модель формирования складской инфраструктуры регионов / П. В. Попов [и др.] // Новости науки и технологий. 2016. Т. 37, № 2. С. 24–28.
12. Ивуть, Р. Б. Проектирование сети автотранспортных парков / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 5. С. 442–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-442-446>.

Поступила 04.02.2021

Подписана в печать 20.04.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Prabir De. (2007) *The Importance of Trade Costs: a Gravity Model Applications*. 3rd ARTNeT Capacity Building Workshop: UNESCAP, Bangkok, 26–30 March 2007. Available at: http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3_d2s3dea.pdf. (Accessed 20 December 2020).
2. Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I. (2020) Estimation of Transport and Logistics Infrastructure Impact of Regions in the Republic of Belarus on its Socio-Economic Indicators. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (2), 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100> (in Russian).
3. Popov P. V. (2019) Influence of Transport and Logistics Infrastructure of the Federal Districts on the Social Indicators of the Russian Federation. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravlenie = Transport: Science, Equipment, Management*, (10), 35–44 (in Russian).
4. Popov P. V. (2019) Influence of Transport and Logistics Infrastructure of the Federal Districts on the Economic Indicators of the Russian Federation. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravlenie = Transport: Science, Equipment, Management*, (12), 19–35 (in Russian).
5. Popov P. V., Miretsky I. Yu. (2019) Assessment of the Impact of the Logistics Infrastructure on the Socio-Economic Indicators of the Astrakhan Region. *Logistika = Logistics*, 146 (1), 46–50 (in Russian).
6. Golskaya Yu. N., Kouznetsova I. A. (2010) Assessment of the Impact of Transport on the Socio-Economic Development of Regions. *Izvestiya Baikalskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of Baikal State University*, (5), 61–64 (in Russian).
7. Roslyakova N. A. (2013) Assessment of the Relationship Between the Parameters of the Transport Complex of the Region and its Economic Growth. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 33 (5), 156–162 (in Russian).
8. On Approval of the Republican Program for the Development of the Logistics System and Transit Potential for 2016–2020: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated July 18, 2016, No 560. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/C21600560_1469134800.pdf (Accessed 27 December 2020) (in Russian).
9. *The Concept of Long-Term Socio-Economic Development of the Russian Federation for the Period up to 2020* (As Amended on 28.09.2018). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ (Accessed 27 December 2020) (in Russian).
10. Popov P. V., Miretsky I. Yu. (2019) Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure. *Ekonomika Regiona = Economy of Region*, 15 (2), 483–492. <https://doi.org/10.17059/2019-2-13> (in Russian).
11. Popov P. V., Miretskii I. Yu., Ivut' R. B., Lapkovskaya P. I. (2016) Model of Warehouse Infrastructure Formation for Regions. *Novosti Nauki i Tekhnologii* [News of Science and Technologies], 37 (2), 24–28 (in Russian).
12. Ivut R. B., Popov P. V., Miretskii I. Yu. (2016) Designing of an Automobile Fleet Network. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (5), 442–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-442-446> (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 20.04.2021

Published online: 30.07.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-357-364>

УДК 330.34

Новая индустриализация и тенденции модернизации белорусской промышленности

Канд. экон. наук, доц. Ю. В. Мелешко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Дана содержательная характеристика современного промышленного производства и выявлены перспективы модернизации белорусской промышленности за счет новой индустриализации. В качестве задач исследования определены: рассмотреть современные концепции трансформации экономических систем под влиянием технологического прогресса, содержательно охарактеризовать новую индустриализацию, в том числе описать технологические и организационные особенности нового промышленного производства, выявить его отличительные черты, определить перспективы использования концепции новой индустриализации для модернизации белорусской промышленности. Методической основой послужили общенаучные методы и принципы познания, а именно: метод дедукции и индукции, метод сравнительного анализа, исторический подход. Автор рассматривает новую индустриализацию как хозяйственный уклад, сложившийся в результате распространения цифровых технологий в современной социально ориентированной, преимущественно рыночной, экономике. Технологической основой нового промышленного производства выступают киберфизические производственные системы, функционирующие за счет промышленного Интернета вещей, Интернета услуг и сетевых механизмов взаимодействия между всеми участниками цепочки создания добавленной стоимости. Развитие цифрового производства и цифровых услуг влечет цифровизацию бизнес-моделей. В результате благодаря триаде цифрового производства, цифровых услуг и цифровых бизнес-моделей формируется гибкое, адаптивное, индивидуализированное промышленное производство. При модернизации белорусского промышленного комплекса, направленной на развитие высокотехнологичного и наукоемкого промышленного производства и повышение эффективности традиционных отраслей промышленности за счет использования самых разнообразных новых технологий, приоритетом должна стать комплексная цифровизация производства, услуг и бизнес-моделей.

Ключевые слова: новая индустриализация, цифровизация, промышленный Интернет вещей, Интернет услуг, цифровые бизнес-модели, модернизация промышленности, промышленная политика, промышленный комплекс Республики Беларусь

Для цитирования: 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>

New Industrialization and Trends in Modernization of Belarusian Industry

Yu. V. Mialeshka¹⁾

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

Abstract. A meaningful characteristic of modern industrial production is given and prospects for the modernization of the Belarusian industry through new industrialization are identified in the paper. In this regard, the objectives of the study have

Адрес для переписки

Мелешко Юлия Викторовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-93-54
meleshko@bntu.by

Address for correspondence

Mialeshka Yuliya V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-93-54
meleshko@bntu.by

been determined: to consider modern concepts of the transformation of economic systems under the influence of technological progress, to substantively characterize the new industrialization, including to describe the technological and organizational features of the new intentional production, to identify its distinctive features, to determine the prospects for using the concept of new industrialization for modernization of the Belarusian industry. The methodological basis was the general scientific methods and principles of cognition, namely: the method of deduction and induction, the method of comparative analysis, historical approach. The author considers the new industrialization as an economic structure that has developed as a result of the spread of digital technologies in a modern socially-oriented, predominantly market economy. The technological basis of the new industrial production is cyber-physical production systems that operate through the industrial Internet of things, the Internet of services and network mechanisms of interaction between all participants in the value added chain. The development of digital production and digital services entails the digitalization of business models. The result is flexible, adaptive, individualized industrial production through the triad of digital production, digital services and digital business models. When modernizing the Belarusian industrial complex, aimed at developing high-tech and knowledge-intensive industrial production and increasing the efficiency of traditional industries through the use of a wide variety of new technologies, the priority should be the comprehensive digitalization of production, services and business models.

Keywords: new industrialization, digitalization, industrial Internet of things, Internet of services, digital business models, industrial modernization, industrial policy, industrial complex of the Republic of Belarus

For citation: Mialesha Yu. V. (2021) New Industrialization and Trends in Modernization of Belarusian Industry. *Science and Technique*. 20 (4), 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-357-364> (in Russian)

Введение

Бурное развитие науки и техники, внедрение их результатов в производство привели к возникновению концепции технологического детерминизма, исходящей из решающей роли техники и технологии в социально-экономическом развитии общества. Сегодня разработано множество интерпретационных моделей трансформации экономических систем под влиянием технологий, среди которых в рамках нашего исследования наибольший интерес представляют модели, описывающие новую индустриализацию: новая промышленная революция, по П. Маршу [1]; третья индустриальная революция, по Дж. Рифкину [2]; четвертая промышленная революция, по К. Швабу [3]; шестой технологический уклад, по С. Ю. Глазьеву [4]. Высокая динамика изменений в производстве порождает множественность концепций модернизации производственно-технологических отношений. В широком смысле в основу концепции промышленных революций, как и родственных ей концепций технологических укладов, положена теоретико-методологическая установка технологического детерминизма, исходящего из того, что распространение новых технологий вызывает кардинальные изменения хозяйственной системы. Так, по мнению авторов упомянутых концепций, «электроника, биотехнологии, Интернет и лазеры, а также множество подразделов этих основных дисциплин» должны привести к новой (пятой) промышленной революции [1, с. 40]; распреде-

ленные возобновляемые источники энергии – к третьей промышленной революции [2]; аддитивные технологии, большие данные, Интернет вещей – к четвертой промышленной революции [3]; нанотехнологии, биоинженерия, информационно-коммуникационные технологии – к шестому технологическому укладу [4].

В 2011 г. Х. Кагерман, В.-Д. Лукас и В. Вальстер на Ганноверской выставке озвучили доклад «Индустрия 4.0: с Интернетом вещей на пути к четвертой промышленной революции» [5], что положило начало широкого использования как теоретиками, так и практиками термина «Индустрия 4.0». Констатируя происходящие в сфере производства изменения, Х. Кагерман, В.-Д. Лукас и В. Вальстер указывают на то, что «Индустрия 4.0» является ответом на четвертую промышленную революцию: «Сегодня сохранить у себя производство означает готовиться к четвертой промышленной революции, основанной на Интернете» [5]. Сама концепция четвертой промышленной революции появилась несколько раньше: «... самая ранняя презентация “Четвертой промышленной революции” восходит к 1988 г., статья (Rostow 1988), в которой представлено участие ученых в производственной команде, которая превратила изобретение в инновации. После этого, в течение десятилетий до 2012 г., эта концепция также использовалась для обозначения развития и применения нанотехнологий (Parthasarathi и Thilagavathi 2011; Hung, Wang и Chang 2012)», – пишут Ю. Ляо и др. [6]. Позже, во многом благодаря одноименной ра-

боте К. Шваба, с четвертой промышленной революцией стали ассоциироваться ««вездесущий» и мобильный Интернет, миниатюрные производственные устройства (которые постоянно дешевеют), искусственный интеллект и обучающиеся машины» [3], а трансформирующееся в результате внедрения этих технологий промышленное производство получило название «Индустрия 4.0».

Общей проблемой для рассматриваемых концепций технологического детерминизма является, как справедливо отмечает С. Ю. Солодовников, то, что «до настоящего времени отсутствуют четкие фундаментальные представления о том, что же следует понимать под технологической эволюцией» [7, с. 45]. Отсутствие методологического единства порождает множественность интерпретационных моделей, ни одна из которых тем не менее не может выступать в качестве теоретико-методологической основы для текущей экономической и промышленных политик. Недостатком этих концепций является представление об универсальности пути развития. По мнению их приверженцев, трансформация производственных отношений происходит одинаково – по примеру страны, ранее других перешедшей в новейшую стадию развития. При этом не учитываются региональные и национальные факторы в производстве, что приводит к идеализации объекта. Адекватная оценка ситуации в современном производстве требует пересмотра теоретико-методологических подходов.

Абстрагируясь от конкретных технологий и материалов и основанных на них классификаций (типологизаций) хозяйствующих укладов, согласимся с Г. И. Идрисовым и другими его соавторами в том, что «взрывное развитие и распространение новых технологий, их проникновение во все сферы человеческой деятельности приводят к быстрым и глубоким изменениям архитектуры рынков, бизнес-моделей и организационных структур, действующих на них игроков» [8, с. 8]. Признавая, что современное промышленное производство существенно (коренным образом) меняется под влиянием новых технологий, чрезвычайно сложно конкретизировать, каких именно технологий. Причина этого – технологическая неопре-

деленность, ставшая сегодня глобальной тенденцией.

В условиях технологической неопределенности смещение фокуса с развития конкретных технологий на новую индустриализацию, по мнению автора статьи, должно стать основой развития промышленного производства. Преимущество такого подхода заключается в его системности. 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.

Основная часть

Основой нового промышленного производства выступают киберфизические системы, предполагающие оцифровку оборудования и промышленной продукции, создание их «цифровых двойников» и управление производственными процессами в виртуальном пространстве в реальном времени с использованием алгоритмов автоматизированного принятия решений. Благодаря такой технологии «обеспечивается моделируемое, архитектурное, коммуникационное и интеракционное сквозное сопровождение продукции, средств производства и производственных систем с учетом меняющихся и изменяющихся процессов. Таким образом, киберфизические системы становятся киберфизическими производственными системами (CPPS) и находят применение в интеллектуальных производственных системах», отмечают специалисты [9, с. 89]. На основе киберфизических систем обеспечивается горизонтальная и вертикальная цифровые интеграции всех производственных процессов, в результате формируется «прослеживаемая в реальном времени и самоорганизующаяся динамическая цепочка создания добавленной стоимости, которая может быть оптимизирована в соответствии с различными критериями, такими как затраты, доступность и потребление ресурсов» [9, с. 24]. Такая интеграция отличается междисциплинарным и международным характером, по-

сколькx объединяет участников производственного процесса независимо от их видов деятельности, масштабов и национальной принадлежности.

Масштабное использование цифровых технологий на всех этапах жизненного цикла промышленной продукции приводит к интеллектуализации производственных процессов, предполагающей не просто автоматизацию оборудования (что стало результатом третьей промышленной революции), но и автоматизацию управленческого процесса. При этом благодаря датчикам и информационным сетям промышленная продукция также становится «умной», т. е. самоконтролируемой и самоуправляемой. «Умная фабрика в сочетании с умной мобильностью, умной логистикой и умной сетью энергоснабжения» выступают «важнейшей составляющей будущей умной инфраструктуры» [9, с. 23].

Выстраивание киберфизической производственной системы с технической точки зрения обеспечивается за счет Интернета вещей, представляющего собой «концепцию вычислительной сети физических предметов (“вещей”), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой» [10, с. 279]. Внедрение Интернета вещей в промышленное производство (промышленный Интернет вещей) позволяет повысить «эффективность труда на предприятиях, экономить на плановом ремонте оборудования и общих эксплуатационных затратах, минимизировать аварии на производстве и в целом увеличивать предсказуемость промышленных систем» [11, с. 71].

Для полноценного функционирования Интернета вещей требуется соответствующее развитие сопутствующих услуг. Услуги, оказываемые посредством Интернета, становятся неотъемлемой частью цифрового промышленного производства, обеспечивая сервисами и приложениями для обмена информацией, сбора, хранения и анализа данных и пр. По словам Х. Кагермана, В.-Д. Лукаса и В. Вальстера, «Интернет вещей дополняется так называемыми интернет-услугами, поскольку возможности смарт-продуктов реализуются через интеллектуальные услуги. Это новое поколение продуктов благодаря межмашинному взаимодейст-

вию (M2M) через Интернет может самостоятельно обмениваться информацией, выполнять действия и управлять друг другом» [5]. В этой связи широкое распространение получил термин «Интернет вещей и услуг», что подчеркивает тесную взаимосвязь между Интернетом вещей и цифровыми услугами.

Сегодня кардинальным образом изменился характер промышленной продукции, которая традиционно была строго привязана к своей материальной форме. В. Т. Рязанов обращает внимание на «стирание границ между производством материальных благ и производством услуг» [12, с. 70], выделяя данный феномен в качестве признака индустриально-технотронного общества. Сегодня услуги, направленные на повышение клиентоориентированности продукции, тесно интегрированы в процесс промышленного производства. Ключевым фактором конкурентоспособности промышленной продукции становится все больше не соотношение цена – качество, а индивидуальные комплексные решения. Клиентоориентированность продукции проявляется в создании продукции, учитывающей индивидуальные предпочтения заказчика, в развитии клиентского сервиса (допродажного, послепродажного обслуживания). Услуги, сопровождающие промышленную продукцию, становятся неотъемлемой частью промышленного производства: формируется интегрированная сервисная поддержка на протяжении всего жизненного цикла изделия. В условиях повышения степени наукоемкости, высокотехнологичности промышленного производства и клиентоориентированности промышленной продукции услуги (услуги по разработке и внедрению продукции в производство; услуги, сопровождающие производственную продукцию) становятся неотъемлемой частью промышленного производства, и их значение «будет и дальше возрастать, что на макроуровне отразится как в увеличении доли добавленной стоимости промышленной продукции, создаваемой этими услугами, так и в возрастании количества занятых в этих сферах производства» [13, с. 74].

Благодаря цифровизации услуг по разработке и внедрению продукции в производство и услуг, сопровождающих промышленную продукцию, возможно перейти к массовому произ-

водству клиентоориентированной промышленной продукции. Индивидуализация сервиса, как отмечает Н. Василенко, «достигается за счет вытеснения обслуживающего персонала цифровыми посредниками, предоставляющими широкий выбор опций без временных и пространственных ограничений» [14, с. 18]. Расширение использования информационных технологий в сфере услуг, как справедливо указывает вышеупомянутый автор, «увеличило уровень осведомленности потребителя о возможностях выбора параметров услуги, поставщика, времени и продолжительности обслуживания и т. д.» [14, с. 15]. Цифровизация услуг направлена на придание продукции дополнительных сервисных характеристик и тем самым на привлечение потребителя. При этом кардинально изменяется коммуникация с клиентами, что выражается не только в изменении способов коммуникации (преимущественно через Интернет), но и принципов построения коммуникации: выстраивание постоянной коммуникации на протяжении всего жизненного цикла, начиная с разработки продукта и заканчивая его утилизацией.

Развитие цифрового производства и цифровых услуг влечет цифровизацию бизнес-моделей. «Интернет вещей не просто подключает физическое пространство к Интернету, позволяя объединять устройства в сети, отслеживать их состояние и реагировать в случае необходимости в режиме реального времени. Интернет вещей кардинальным образом меняет бизнес-архитектуру. Появляются новые модели ценообразования и использования товаров, опирающиеся на Интернет вещей и подключенную физическую среду, новые инструменты, обеспечивающие возможность перехода от транзакционной выручки к модели выручки по подписке», – отмечалось ранее [15, с. 121]. Т. В. Сергиевич указывает на то, что в условиях цифровизации производства «важным становится своевременное встраивание виртуальных элементов в существующие бизнес-модели для поддержки и повышения их эффективности. Необходимо развивать компетенции специалистов в сфере управления адаптацией существующих бизнес-процессов под условия цифровой экономики» [16, с. 102].

Благодаря Интернету вещей и услуг стало возможным перейти к бизнес-моделям, ориентированным не на сбыт промышленной продукции как таковой, а на передачу потребителям функционала производимой продукции. В связи с этим распространение получают контракты с предоставлением полного спектра услуг, контракты с оплатой по результатам, по мере использования или по мере готовности к эксплуатации, контракты жизненного цикла. Для потребителя все более важным становится не наличие у него продукции как таковой, а гарантия ее функционирования.

По мнению Р. Драта и А. Хорха, «революция – это не обязательно техническая реализация, а новый горизонт бизнес-моделей, услуг и индивидуальных продуктов» [17]. Иными словами, новое индустриальное производство предполагает не только цифровое производство, но и сопутствующие ему цифровые услуги и цифровые бизнес-модели. Все стадии промышленного производства тесно взаимосвязаны, и цифровизация одной (производственной стадии) влечет цифровизацию остальных.

Гибкое и адаптивное новое производство требует более тесного взаимодействия между всеми участниками цепочки создания добавленной стоимости, а также с конечными потребителями. В. Л. Гурский, описывая «Индустрию 4.0», справедливо отмечает, что организационной основой нового промышленного производства «являются механизмы глобальной координации деятельности киберфизических систем (начиная от бытовой техники и заканчивая мегакорпорациями) как между собой, так и с социальными системами (включая государство)» [18, с. 164]. При этом наиболее приемлемой организационной формой выступают сети, приходящие на смену жесткой иерархической структуре управления в промышленном производстве.

На основе информационных технологий создаются единые цифровые платформы, пронизывающие всю сетевую цепочку создания добавленной стоимости промышленной продукции. В рамках такой платформы объединяются хозяйствующие субъекты, производимая продукция («умная продукция») и производственные системы («умная фабрика») на протяжении всего жизненного цикла продукции. Единая

цифровая платформа играет роль площадки для взаимодействия автономных предприятий. В сочетании с киберфизическими производственными системами сетевая форма организации способна обеспечить высокий уровень гибкости производства. «Самоуправляемые сетевые структуры, построенные на горизонтальных связях и постоянных согласованиях, обеспечивают скорость и адекватность решений в соответствии с “тиранией момента”», – считают экономисты [19, с. 78]. Бизнес- и производственные процессы находятся в постоянной разработке и могут оперативно реагировать (незадолго до или во время производства и, возможно, даже в ходе текущей работы) на вызовы, например сбои поставок или изменившиеся требования клиентов. За счет привлечения предприятий-партнеров появляются дополнительные возможности оптимизировать использование производственных мощностей: производственные линии могут объединяться между компаниями ситуативно, т. е. в случае возникновения необходимости и на неопределенный срок.

Благодаря киберфизическим системам, цифровым услугам и цифровым моделям, а также сетевой форме взаимодействия в новом индустриальном производстве становятся возможными:

- флексибилизация производства, включающая построение динамических бизнес-процессов;
- индивидуализация продукции, которая возможна в том числе и потому, что благодаря цифровизации производство единичной продукции и небольших партий делается рентабельным;
- оптимизированное принятие решений, достигаемое за счет получения актуальной информации в режиме реального времени;
- высокие производительность и эффективность ресурсов;
- создание добавленной стоимости промышленной продукции с помощью новых цифровых услуг.

С. Ю. Солодовников утверждает, что «структурная политика в Республике Беларусь должна основываться на парадигмальной замене модели выживания отечественных предприятий реального сектора экономики на модель новой индустриализации, т. е. на форми-

ровании новой структуры народного хозяйства, основой которой должен стать сверхиндустриальный промышленный уклад» [20, с. 90]. Соглашаясь с данным тезисом, уточним, что переход к сверхиндустриальному промышленному укладу не может быть осуществлен без цифровизации национального промышленного комплекса.

ВЫВОДЫ

1. Новая индустриализация предполагает широкое использование информационно-коммуникационных технологий, что обусловлено, с одной стороны, увеличением доли высокотехнологичных и наукоемких видов деятельности, требующих обработки большого количества информации, с другой – цифровизацией традиционных отраслей промышленности.

2. Внедрение технологии четвертой промышленной революции создаст материально-производственную базу для формирования гибкого, адаптивного, клиентоориентированного промышленного производства. Распространение сетевых форм взаимодействия будет способствовать выстраиванию динамичной производственной сети, объединяющей всех участников цепочки создания добавленной стоимости. Цифровая трансформация промышленных предприятий Республики Беларусь не должна ограничиваться интеллектуализацией производственных процессов. Информационно-коммуникационные технологии должны быть встроены в повседневную деятельность промышленных предприятий, т. е. должна быть создана современная цифровая инфраструктура предприятия.

3. Ключевым фактором обеспечения конкурентоспособности белорусских предприятий промышленного комплекса должно стать создание новых цифровых бизнес-моделей. Учитывая глобальную технологическую неопределенность, высокую динамичность информационно-коммуникационных технологий, а также ограниченность финансовых ресурсов предприятий, необходим взвешенный подход к выбору внедряемых технологий. Оценка потенциальной эффективности цифровых технологий для предприятия промышленного комплекса должна осуществляться не только исходя из

соотношения эффекта к затратам, но и с учетом влияния внедряемых технологий на бизнес-модель предприятия. Такой подход позволит выявить наиболее перспективные технологии с точки зрения цифровизации бизнес-моделей и ранжировать цифровые проекты по приоритету, тем самым даст возможность выстроить стратегию цифрового развития предприятия и перейти к промышленному производству нового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марш, П. Новая промышленная революция / П. Марш. М.: Изд-во Института Гайдара, 2015. 419 с.
2. Рифкин, Дж. Третья промышленная революция / Дж. Рифкин; 4-е изд. М.: Альпина но-фикшн, 2017. 409 с.
3. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. М.: Сбербанк: Эксмо, 2017. 202 с.
4. Глазьев, С. Ю. Великая цифровая революция: вызовы и перспективы для экономики XXI века [Электронный ресурс] / С. Ю. Глазьев. 2017. Режим доступа: <http://www.glazev.ru/articles/6-jekonomika/54923-velikaja-tsifrovaja-revoljutsija-vyzovy-i-perspektivy-dlja-jekonomiki-i-veka>. Дата доступа: 20.11.2019.
5. Kagermann, H. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution [Electronic resource] / H. Kagermann, W.-D. Lukas, W. Wahlster // VDI Nachrichten. 2011. Mode of access: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>. Date of access: 25.07.2019.
6. Past, Present and Future of Industry 4.0 – a Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal / Y. Liao [et al.] // International Journal of Production Research. 2017. Vol. 55, No 12. P. 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
7. Солодовников, С. Ю. Экономика рисков / С. Ю. Солодовников // Экономическая наука сегодня. 2018. № 8. С. 16–55.
8. Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России / Г. И. Идрисов [и др.] // Вопросы экономики. 2018. № 4. С. 5–25. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-5-25>.
9. Kagermann, H. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 [Electronic resource] / H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig. 2013. Mode of access: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. Date of access: 08.09.2019.
10. Мелешко, Ю. В. Инфраструктурное обеспечение промышленного Интернета вещей / Ю. В. Мелешко // Экономический базис развития науки и технологий в России: матер. Междунар. науч. конф., 19–20 окт. 2018 г. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. С. 279–282.
11. Мелешко, Ю. В. Становление мирового рынка промышленного Интернета вещей / Ю. В. Мелешко // Устойчивое развитие экономики: состояние, проблемы, перспективы: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., г. Пинск, 27 апр. 2018 г. Пинск: ПолесГУ, 2018. С. 69–71.
12. Рязанов, В. Т. Экономическая стратегия России: неоиндустриальный императив / В. Т. Рязанов // Новая индустриализация России: стратегические приоритеты страны и возможности Урала. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2018. С. 62–81.
13. Мелешко, Ю. В. Значение услуг промышленного характера в повышении конкурентоспособности промышленных предприятий (в контексте четвертой промышленной революции) / Ю. В. Мелешко // Экономическая наука сегодня. 2017. № 6. С. 64–78.
14. Василенко, Н. Этапы автоматизации услуг в контексте развития экономики / Н. Василенко // Экономист. 2018. № 10. С. 12–19.
15. Мелешко, Ю. В. Интернет вещей как фактор трансформации бизнес-моделей / Ю. В. Мелешко // Социально-экономическое развитие организаций и регионов Беларуси: эффективность и инновации: сб. науч. ст. Витебск: ВГТУ, 2018. С. 120–122.
16. Сергиевич, Т. В. Развитие электронной торговли: проблемы и перспективы / Т. В. Сергиевич // Устойчивое развитие экономики: состояние, проблемы, перспективы: сб. трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Пинск, 26 апр. 2019 г. Пинск: ПолесГУ, 2019. С. 100–102.
17. Drath, R. Industrie 4.0 – Hit or Hype? / R. Drath, A. Horch // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014. Vol. 8, No 2. P. 56–58. <https://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>.
18. Гурский, В. Л. Сетевая концепция развития механизма согласования промышленных политик государств – членов ЕАЭС в условиях новой технологической революции / В. Л. Гурский // Беларусь в современном мире: матер. XVI Междунар. науч. конф., посвящ. 97-летию образования Бел. гос. ун-та: сб. науч. ст. Минск: БГУ, 2017. С. 154–155.
19. Горизонтальная культура социальных взаимодействий – потенциал развития экономики и общества в XXI веке / С. Ю. Солодовников [и др.]. Минск: БНТУ, 2018. 325 с.
20. Солодовников, С. Ю. Взаимосвязь структурной политики государства и модернизации реального сектора экономики / С. Ю. Солодовников // Экономическая наука сегодня. 2018. № 7. С. 84–94.

Поступила 31.08.2019

Подписана в печать 25.01.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Marsh P. (2015) *The New Industrial Revolution*. Moscow, Publishing House of Gaidar Institute. 419 (in Russian).
2. Rifkin J. (2017) *The Third Industrial Revolution. 4th Edition*. Moscow, Alpina Non-Fikshen Publ. 409 (in Russian).
3. Schwab K. (2017) *The Fourth Industrial Revolution*. Moscow, Sberbank: Eksmo Publ. 202 (in Russian).
4. Glazev S. Yu. (2017) The Great Digital Revolution: Challenges and Perspectives for the Economy of the XXI Century. Available at: <http://www.glazev.ru/articles/6-jekonomika/54923-velikaja-tsifrovaja-revoljutsija>

- vyzovy-i-perspektivy-dlja-jekonomiki-i-veka (Accessed 20 November 2019) (in Russian).
5. Kagermann H., Lukas W.-D., Wahlster W. (2011) Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg Zur 4. Industriellen Revolution. *VDI Nachrichten*. Available at: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (Accessed 25 July 2019) (in German).
6. Liao Y., Deschamps F., de Freitas E., Loures R., Felipe L., Ramos P. (2017) Past, Present and Future of Industry 4.0 – a Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal. *International Journal of Production Research*, 55 (12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
7. Solodovnikov S. Yu. (2018) Risk Economics. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnia* [Economics Today], (8), 16–55 (in Russian).
8. Idrisov G. I., Knyagin V. N., Kudrin A. L., Rozhkova E. S. (2018) New Technological Revolution: Challenges and Opportunities for Russia. *Voprosy Ekonomiki* [Economic Issues], (4), 5–25. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-5-25> (in Russian).
9. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. (2013) *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort Sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Available at https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf (Accessed 8 September 2019) (in German).
10. Meleshko Yu. V. (2018) Infrastructure Support of the Industrial Internet of Things. *Ekonomicheskii Baza Razvitiya Nauki i Tekhnologii v Rossii: Mater. Mezhdunar. Nauch. Konf., 19–20 Okt. 2018 g.* [The Economic Basis for the Development of Science and Technology in Russia: Proceedings of International Scientific Conference, Oct. 19–20, 2018]. Simferopol, Publishing House – Typography “ARIAL”, 279–282 (in Russian).
11. Meleshko Yu. V. (2018) Formation of the Global Market for the Industrial Internet of Things. *Ustoichivoe Razvitie Ekonomiki: Sostoyanie, Problemy, Perspektivy: Sb. Tr. XII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Pinsk, 27 Apr. 2018 g.* [Sustainable Development of the Economy: State, Problems, Prospects: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Pinsk, Apr. 27, 2018]. Pinsk, Polessky State University, 69–71 (in Russian).
12. Ryazanov V. T. (2018) Russia's Economic Strategy: Neo-industrial Imperative. *New Industrialization of Russia: Strategic Priorities of the Country and Opportunities of the Urals*. Ekaterinburg, Ural State University of Economics, 62–81 (in Russian).
13. Meleshko Yu. V. (2017) The Importance of Industrial Services in Increasing the Competitiveness of Industrial Enterprises (in the Context of the 4th Industrial Revolution). *Ekonomicheskaya Nauka Segodnia* [Economics Today], (6), 64–78 (in Russian).
14. Vasilenko N. (2018) Stages of Service Automation in the Context of Economic Development. *Ekonomist*, (10), 12–19 (in Russian).
15. Meleshko Yu. V. (2018) The Internet of Things as a Factor in Transforming Business Models. *Sotsial'no-Ekonomicheskoe Razvitie Organizatsii i Regionov Belarusi: Effektivnost' i Innovatsii: Sb. Nauch. St.* [Socio-Economic Development of Organizations and Regions of Belarus: Efficiency and Innovation: Collection of Scientific Papers]. Vitebsk, Vitebsk State Technical University, 120–122 (in Russian).
16. Sergievich T. V. (2019) Development of Electronic Commerce: Problems and Prospects. *Ustoichivoe Razvitie Ekonomiki: Sostoyanie, Problemy, Perspektivy: Sb. Trudov XIII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Pinsk, 26 Apr. 2019 g.* [Sustainable Development of the Economy: State, Problems, Prospects: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, Pinsk, Apr. 26, 2019]. Pinsk, Polessky State University, 100–102 (in Russian).
17. Drath R., Horch A. (2014) Industrie 4.0 – Hit or Hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8 (2), 56–58. <https://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>.
18. Gurskii V. L. (2017) Network Concept for the Development of a Mechanism for Coordinating Industrial Policies of the EAEU Member States in the Context of a New Technological Revolution. *Belarus' v Sovremennom Mire: Mater. XVI Mezhdunar. Nauch. Konf., Posvyashch. 97-letiyu Obrazovaniya Belor. Gosud. Un-ta: Sb. Nauch. St.* [Belarus in the Modern World: Proceedings of the XVI International Scientific Conference Dedicated to the 97th Anniversary of the Formation of the Belarusian State University: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian State University, 154–155 (in Russian).
19. Solodovnikov S. Yu., Vasyuchenok L. P., Kuz'mitskaya T. V., Meleshko Yu. V., Sergievich T. V., Solodovnikova T. V. (2018) *Horizontal Culture of Social Interaction – the Potential for the Development of the Economy and Society in the XXI Century*. Minsk, Belarusian National Technical University, 325 (in Russian).
20. Solodovnikov S. Yu. (2018) Relationship Between the Structural Policy of the State and the Modernization of the Real Sector of the Economy. *Ekonomicheskaya Nauka Segodnia* [Economics Today], (7), 84–94 (in Russian).

Received: 31.08.2019

Accepted: 25.01.2021

Published online: 30.07.2021