

# НАУКА и ТЕХНИКА

Международный  
научно-технический журнал

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

**Учредитель**  
Белорусский  
национальный технический  
университет



# Science and Technique

International  
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002  
Publication frequency –  
bimonthly

**Founder**  
Belarusian  
National Technical  
University

**Vol. 23 / No 5 / 2024**

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

### Информатика

- Радкевич А. А., Павлюковец С. А.**  
Исследование динамических характеристик  
голономного робота с колесами типа меканум  
на основе 3D параметрической  
имитационной модели ..... 359
- Pande S. V., Patil D. P., Sangole M. K., Antonov S.**  
Analysis and Implementation  
of Metamaterial-Inspired Microstrip Antenna  
for Wireless Applications  
(Панде С. В., Патиль Д. П., Санголе М. К.,  
Антонов С.  
Анализ и использование микрополосковой  
антенны на основе метаматериала  
для беспроводной связи) ..... 370

### Машиностроение и машиноведение

- Коротеев А. О., Фетисова Е. А., Паршин С. Г.,  
Коротеева А. А.**  
Технологические особенности плавления  
присадочной проволоки при дуговой сварке  
и наплавке с введением SF<sub>6</sub>  
в защитную газовую атмосферу ..... 380

## CONTENTS

### Informatics

- Radkevich A. A., Pauliukavets S. A.**  
Investigation of Dynamic Characteristics  
of Holonomic Robot with Mecanum  
wheels Based on 3D Parametric  
Simulation Model ..... 359
- Pande S. V., Patil D. P., Sangole M. K., Antonov S.**  
Analysis and Implementation  
of Metamaterial-Inspired Microstrip Antenna  
for Wireless Applications ..... 370

### Mechanical Engineering and Engineering Science

- Karatseyeu A. A., Fiatsisava K. A., Parshin S. G.,  
Karatseyeva A. A.**  
Technological Features of Filler Wire Melting  
for Arc Welding and Surfacing  
with the Introduction of SF<sub>6</sub>  
into Protective Gas Atmosphere ..... 380

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Мойсейчик Е. А., Яковлев А. А.</b><br>Деформационное тепло<br>при растяжении стальных элементов . . . . . | 390 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Механика деформируемого твердого тела

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Гончарова С. В., Хвасько В. М., Гончарова Е. А.,<br/>Махнач Н. А.</b><br>Исследование деформаций статически<br>неопределимой балки в промышленных<br>и судостроительных конструкциях . . . . . | 397 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Строительство

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Богославчик П. М., Евдокимов В. А.</b><br>Основные принципы проектирования резервного<br>водосброса с размываемой вставкой . . . . .                                  | 404 |
| <b>Яцевич П. П., Афанасенко А. А.</b><br>Методика оценки адгезионных связей вяжущего<br>с каменным материалом на основе<br>вакуумно-температурного воздействия . . . . . | 409 |

### Транспорт

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Le Van Nghia, Dam Hoang Phuc, Tran Trong Dat,<br/>Nguyen Trung Kien, Kharitonchik S. V., Kussyak V. A.</b><br>Control Voltage Effect on Operational Characteristics<br>of Vehicle Magnetorheological Damper<br>(Ле Ван Нгия, Дам Хоанг Пхук, Чан Чонг Дат,<br>Нгуен Чунг Кьен, Харитончик С. В.,<br>Кусяк В. А.)<br>Влияние управляющего напряжения<br>на эксплуатационные характеристики<br>магнитореологического демпфера автомобиля) . . . | 417 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Экономика промышленности

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Коростышевская Е. М., Стоянова О. В.</b><br>Формирование центров превосходства<br>в России с целью стимулирования<br>промышленного развития . . . . . | 427 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Moiseychik E. A., Yakovlev A. A.</b><br>Deformation Heat<br>in Tension of Steel Elements . . . . . | 390 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Deformation in Solid Mechanics

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Goncharova S. V., Khvasko V. M., Goncharova E. A.,<br/>Makhnach N. A.</b><br>Study of Deformations in Statically<br>Indeterminate Beam in Industrial<br>and Shipbuilding Structures . . . . . | 397 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Civil and Industrial Engineering

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A.</b><br>Basic Principles for Designing Backup Spillway<br>with Eroded Insert . . . . .                                           | 404 |
| <b>Yatsevich P. P., Afanasenka A. A.</b><br>Methodology for Assessing Adhesive Bonds<br>of Binder with Stone Material Based<br>on Vacuum-Temperature Effects . . . . . | 409 |

### Transport

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Le Van Nghia, Dam Hoang Phuc, Tran Trong Dat,<br/>Nguyen Trung Kien, Kharitonchik S. V., Kussyak V. A.</b><br>Control Voltage Effect on Operational Characteristics<br>of Vehicle Magnetorheological Damper . . . . . | 417 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Economy in Industry

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Korostyshevskaya E. M., Stoianova O. V.</b><br>Formation of Centers of Excellence<br>in Russia for Stimulating<br>Industrial Development . . . . . | 427 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**Главный редактор**  
**Борис Михайлович Хрусталеv**

**Редакционная коллегия**

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

**Editor-in-Chief**  
**Boris M. Khroustalev**

**Editorial Board**

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

**Пимьента П.** (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),  
**Родригес Ж. П. К.** (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),  
**Романюк Ф. А.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
**Сидерис К.** (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),  
**Соболев К.** (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),  
**Сумров В. В.** (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),  
**Феличетти Р.** (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),  
**Чжао Цзи** (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),  
**Чирик 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 научный редактор**

В. Н. Гурьянчик

**Адрес редакции**

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

Тел. +375 17 320-65-14

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

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.  
Регистрационный номер 285

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

**ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622**

Подписано в печать 30.09.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 9,28. Тираж 65 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2024

**Lead Science Editor**

V. N. Guryanchyk

**Address**

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

Tel. +375 17 320-65-14

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

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369>

УДК 004.896

## Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D параметрической имитационной модели

Магистрант А. А. Радкевич<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. С. А. Павлюковец<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье проведен анализ динамических показателей четырехколесного мобильного робота, приводимого в движение всенаправленными колесами типа меканум. Для получения информации о его динамических характеристиках разработана компьютерная модель в программной среде блочного моделирования MATLAB Simulink, которая позволила исследовать поведение голономного мобильного объекта с колесами меканум в пуско-тормозных режимах, не только основываясь на его математической модели, но и учитывая массогабаритные параметры робота, внедренные в модель через интеграцию трехмерного цифрового прототипа исследуемого объекта. Изучение динамики всенаправленного робота рассматривалось в рамках моделирования разгона, равномерного движения и торможения объекта на плоскости по прямолинейной траектории. В результате получены зависимости кинематических, динамических и механических характеристик: угловой скорости и вращательного момента каждого колеса от времени, линейной скорости центра масс робота от времени, пройденного роботом пути от времени, ошибки позиционирования при отработке заданного перемещения, пространственной визуализации колебаний скорости. При помощи инструмента Mechanical Explorer с использованием интегрированного в модель цифрового клона исследуемого робота получена анимация движения объекта по траектории. Примененный подход, основанный на интеграции математической блочной и трехмерной параметрической моделей объекта с возможностью визуализации и анимации результатов, позволяет наиболее полно исследовать динамику и кинематику нелинейных мехатронных систем. Полученные данные об ошибках позиционирования и колебаниях скорости в трех координатах позволили сделать вывод о наличии случайных колебаний при движении робота, однако это не оказало заметного влияния на точность отработки заданной траектории.

**Ключевые слова:** мобильный робот, всенаправленное движение, колесо меканум, голономный объект, движение по траектории, имитационное моделирование, параметрическое моделирование, цифровой прототип, динамические характеристики

**Для цитирования:** Радкевич, А. А. Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D параметрической имитационной модели / А. А. Радкевич, С. А. Павлюковец // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 359–369. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369>

## Investigation of Dynamic Characteristics of Holonomic Robot with Mecanum wheels Based on 3D Parametric Simulation Model

А. А. Radkevich<sup>1)</sup>, S. A. Pauliukavets<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper analyzes dynamic characteristics of a four-wheeled mobile robot driven by omnidirectional mecanum wheels. To obtain information about dynamic characteristics of the robot, a computer model was developed in the MATLAB Simulink block modeling software environment. The constructed simulation model allowed to research the behavior

---

### Адрес для переписки

Павлюковец Сергей Анатольевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Б. Хмельницкого, 9,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-61  
[s.pauliukavets@gmail.com](mailto:s.pauliukavets@gmail.com)

### Address for correspondence

Pauliukavets Siarhei A.  
Belarusian National Technical University  
9, B. Khmel'nitsky str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Тел.: +375 17 293-95-61  
[s.pauliukavets@gmail.com](mailto:s.pauliukavets@gmail.com)

of a holonomic mobile object with mecanum wheels in start-braking modes, based not only on its mathematical model, but also taking into account the weight and size parameters of the robot, introduced into the model through the integration of a three-dimensional digital prototype of the object. The investigation of the omnidirectional robot dynamics was considered within modeling the acceleration, uniform movement and deceleration of an object on a plane along a rectilinear trajectory. As a result, the dependences of kinematic, dynamic and mechanical characteristics were obtained, such as the dependence of angular velocity and torque of each wheel on time; the dependence of linear velocity of the robot's center of mass on time; the dependence of distance traveled by the robot on time; positioning errors while processing a given movement; spatial visualization of speed fluctuations. With the help of Mechanical Explorer tool, using a digital clone of the robot integrated into the model, an animation of the object's movement along the trajectory was obtained. This approach, based on the integration of mathematical block and three-dimensional parametric models of the object with the possibility of visualization and animation of the results, allows to most fully investigate the dynamics and kinematics of nonlinear mechatronic systems. The obtained information of positioning errors and speed fluctuations in three coordinates allowed to conclude that there were random fluctuations during the robot's movement, but their presence did not have a noticeable effect on the accuracy of the specified trajectory. мобильный робот, всенаправленное движение, колесо меканум, голономный объект, движение по траектории, имитационное моделирование, параметрическое моделирование, цифровой прототип, динамические характеристики

**Keywords:** mobile robot, omnidirectional motion, mecanum wheel, holonomic object, trajectory movement, simulation modeling, parametric modeling, digital prototype, dynamic characteristics

**For citation:** Radkevich A. A., Pauliukavets S. A. (2024) Investigation of Dynamic Characteristics of Holonomic Robot with Mecanum wheels Based on 3D Parametric Simulation Model. *Science and Technique*. 23 (5), 359–369. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369> (in Russian)

## Введение. Постановка цели и определение задач исследования

Проблематика исследования и анализа движения голономного мобильного объекта, то есть такого, который способен непрерывно перемещаться в любых направлениях, ограниченных только его степенями подвижности, опирается на решение сложных задач кинематики и динамики, формализующих поведение объекта как в статическом, так и в динамическом режимах работы. В задаче анализа динамических свойств мобильного робота при известных его параметрах и структуре необходимо основываться на показателях качества системы, а именно точности позиционирования при отработке заданной траектории, отклонении от намеченной координаты в нескольких плоскостях, колебательности переменных в переходных режимах при динамических условиях движения.

Вопросы анализа динамики и кинематики всенаправленных мобильных роботов активно изучаются и отражены в ряде научных исследований. Так, в статье [1] авторы отметили, что кинематика движения мобильных роботов с колесами меканум на плоскости достаточно хорошо исследована, в то время как динамика свободного и управляемого движения практически не рассматривается. В этой же работе представлены уравнения динамики управляемого движения при движении робота на колесах меканум вдоль различных траекторий. Дан-

ному вопросу уделено внимание и в тексте статьи [2], где исследована динамика движения мобильного робота при различных внешних силах, действующих на колеса меканум. Сочетание динамического и кинематического управления роботами на колесах меканум, как отмечено в [3], позволяет повысить точность управления и осуществить его оптимизацию, однако требует проработанную математическую модель системы. В отличие от кинематического управления параметрами скоростей колес либо центра масс робота модель, составленная с учетом динамических факторов (значений моментов, сил трения), демонстрирует более высокую точность при движении.

Ряд исследований посвящен компьютерному моделированию режимов движения всенаправленных мобильных роботов. Как правило, моделирование мобильных роботов на колесах меканум осуществляется для изучения отработки заданной траектории, а сам робот рассматривается с позиции системы управления. В частности, в докладе [4] спрогнозирована траектория для управления шестиколесным мобильным роботом меканум и проведено моделирование системы управления, после чего показано сравнение исходной и воспроизведенной траекторий движения. В работе [5] осуществлена симуляция движения робота на колесах меканум с преодолением препятствий по сигналам от датчика дальности. В статье [6] проведен сравнительный анализ моделирования робота на традицион-

ных и меканум колесах и рассмотрены его электродинамические и электромеханические характеристики.

Приведенный обзор научных исследований показывает, что существует проблема моделирования мобильных всенаправленных роботов для анализа их динамических показателей, которая представляется актуальной. Специфика используемых колес меканум, обладающих сложной кинематикой, зачастую пренебрегается при моделировании из-за большого числа геометрических и механических параметров, в результате чего полученные зависимости в полной мере не отражают реальную динамику движения мобильного робота.

В данной статье предлагается имитационная модель голономного робота с колесами меканум, составленная с учетом не только его кинематики, но и механических и геометрических характеристик, напрямую полученных из интегрированного в модель компонента трехмерного цифрового прототипа рассматриваемого робота. Такой подход, во-первых, позволяет получить динамические показатели, наиболее приближенные к реальным по сравнению с моделью, содержащей только кинематические и динамические составляющие, во-вторых, предоставляет возможность произвести трехмерное параметрическое моделирование цифрового прототипа с его визуализацией, что является более наглядным восприятием результатов моделирования.

Выполнение поставленной цели работы – исследование динамических показателей всенаправленного робота на колесах меканум – основывается на решении таких задач, как:

- 1) разработка имитационной модели робота с использованием твердотельного цифрового прототипа, учитывающая геометрические и механические параметры, а также кинематику и динамику объекта, на основании его математической модели;
- 2) моделирование динамических режимов движения робота при помощи составленной имитационной модели;
- 3) анализ полученных зависимостей, определение ошибки позиционирования и соответствия динамических параметров критериям качества;
- 4) оценка влияния используемых колес меканум на динамические показатели при движе-

нии голономного робота по результатам моделирования с использованием трехмерного параметрического прототипа.

Для построения имитационной модели формализуем условия движения робота. Геометрические данные объекта отражены в 3D модели робота, сконструированной в SolidWorks и импортированной в MATLAB Simulink. Масса робота 2,16 кг (в том числе масса корпуса 0,4 кг, обода колеса 0,3 кг, ролика колеса 0,01 кг, ступицы 0,05 кг), диаметр колеса 0,092 м, длина ролика 0,047 м, число роликов в колесе 9. Движение происходит в трехмерной системе координат (XYZ) по плоскости, представляющей собой недеформируемую поверхность, сцепление которой с роликами колес происходит без проскальзывания, а все элементы робота жестко связаны между собой.

#### **Разработка компьютерной параметрической 3D модели мобильного робота с колесами меканум**

Математическая модель четырехколесного мобильного робота на всенаправленных колесах типа меканум, используемая для блочного представления кинематики и динамики движения, определена авторами в статье [7]. С использованием этой модели, а также построенного в среде автоматизированного проектирования SolidWorks цифрового прототипа объекта, для реализации моделирования в программном пакете MATLAB Simulink собрана блок-схема модели с применением блоков из библиотек Simscape и Simulink с использованием дополнительного набора инструментов Mobile Robotics Simulation Toolbox.

Данный пакет содержит инструментарий для моделирования мобильного робота и разработки алгоритмов управления. В частности, Mobile Robotics Simulation Toolbox предоставляет возможности 3D-визуализации, позволяя симулировать отработку заданной траектории робота через окно Mechanics Explorer. Также была задействована подключенная библиотека Simscape Multibody Multiphysics Library, содержащая блоки механических передач и динамических объектов, позволяющая моделировать нелинейные электромеханические системы. Общий вид имитационной модели движения робота показан на рис. 1.

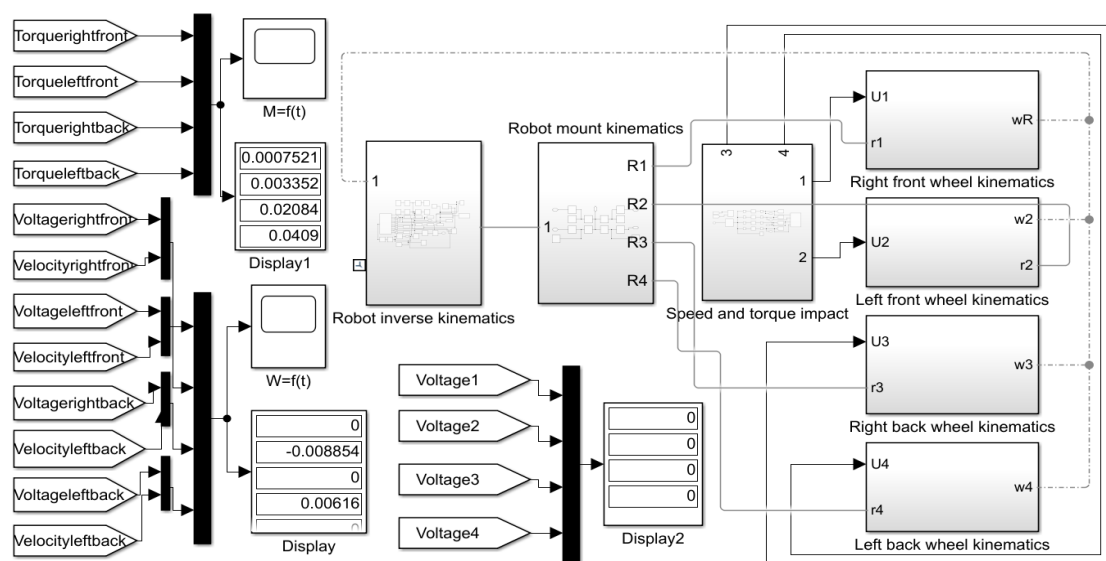


Рис. 1. Общий вид имитационной модели мобильного робота с колесами типа меканум

Fig. 1. General view of simulation model of mobile robot with mecanum wheels

Модель содержит в себе подсистемы инверсной кинематики корпуса и подвески робота и четыре подсистемы кинематики и динамики приводных колес, а также блок задания управляющего воздействия. Выходными величинами для моделируемого робота являются угловые скорости вращения каждого колеса и вращательные моменты колес, полученные через

блоки *Scope* с числовыми значениями, отображаемыми на блоках *Display*. Более детальный анализ состояния робота как твердотельного объекта отображается через графики блока *Cartesian Joint*. Модели подсистем кинематики корпуса и подвески робота, кинематики правого переднего меканум колеса и подсистемы задания скорости и момента отображены на рис. 2–5.

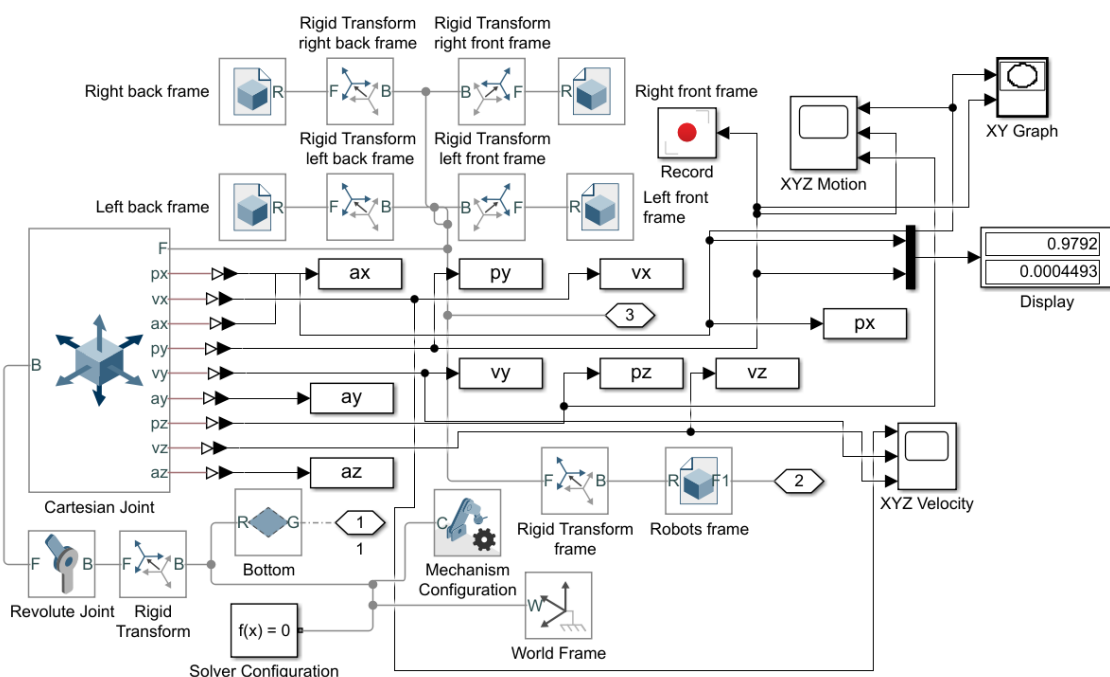


Рис. 2. Модель подсистемы инверсной кинематики робота и кинематики корпуса

Fig. 2. Model of robot inverse kinematics and frame kinematics subsystem

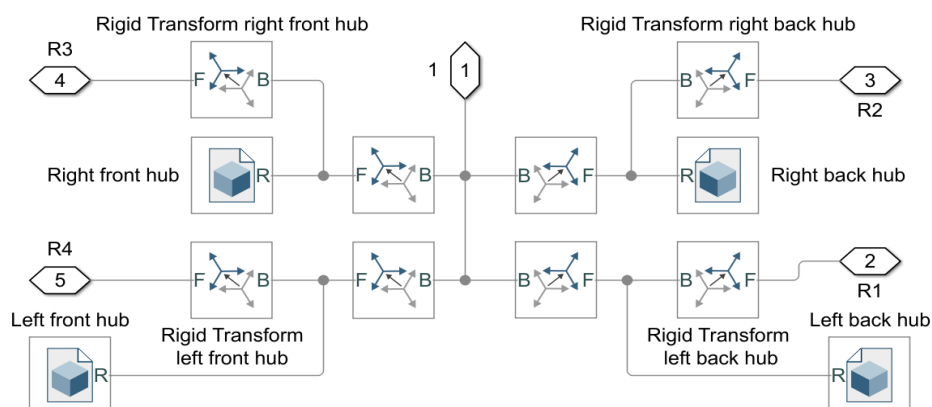


Рис. 3. Модель подсистемы кинематики подвески корпуса робота

Fig. 3. Model of robot frame suspension kinematics subsystem

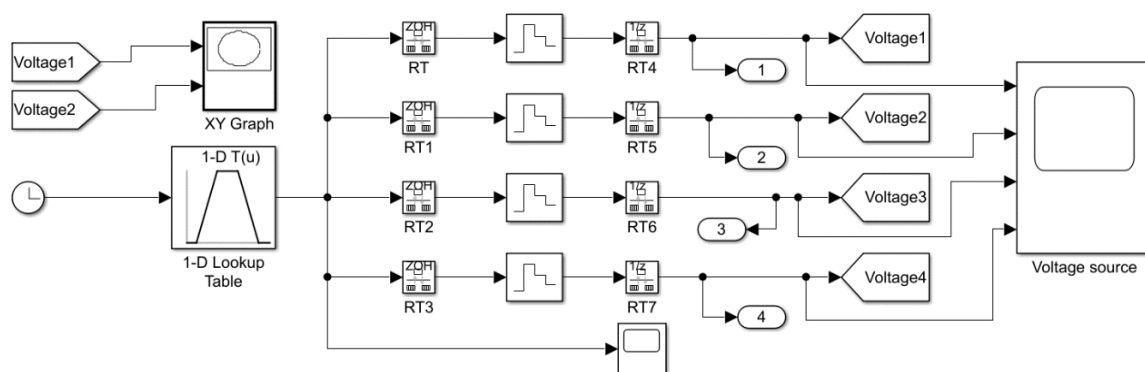


Рис. 4. Модель подсистемы задания управляющего воздействия

Fig. 4. Model of subsystem for specifying control action

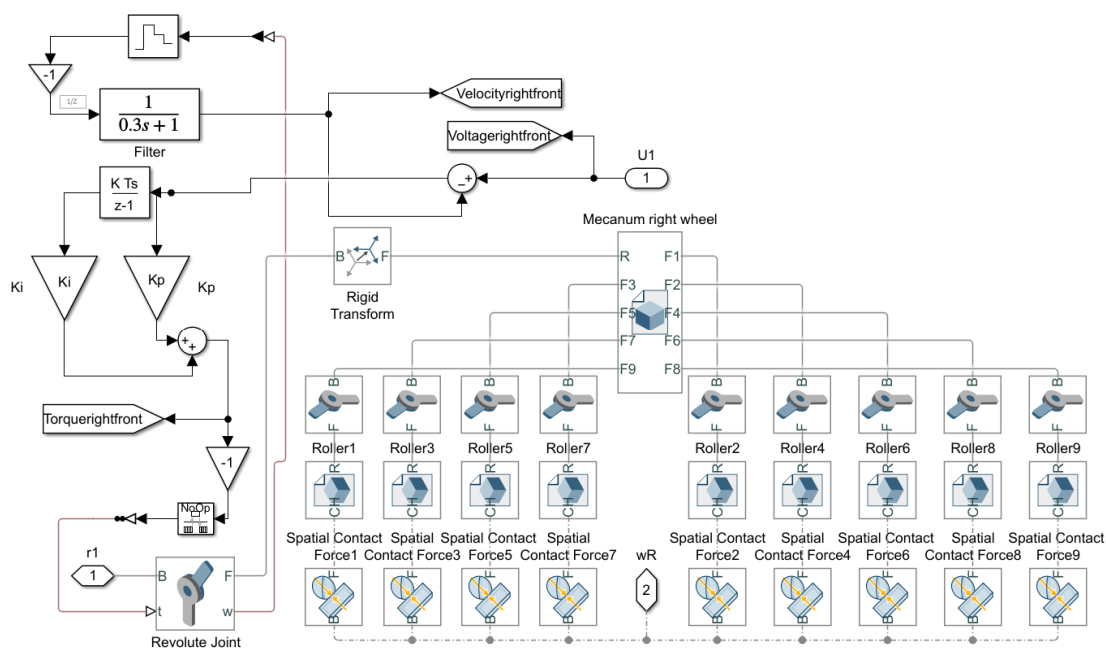


Рис. 5. Модель подсистемы кинематики и динамики правого переднего колеса

Fig. 5. Model of kinematics and dynamics subsystem of right front wheel

Подсистемы кинематики и динамики левого переднего, заднего правого и заднего левого колес меканум идентичны подсистеме, изображенной на рис. 5 [8], за исключением того, что в блоке *Rigid Transform* для каждого колеса изменяется угол поворота в плоскости *XYZ*.

Кинематические зависимости задаются в блоках расчета прямой и обратной задач кинематики с использованием функций MATLAB и при помощи специальных блоков библиотеки *Simscape*, позволяющих произвести интеграцию с пакетом твердотельного 3D моделирования *Solidworks*. Конструкция модели подразумевает жесткую механическую связь всех элементов, за исключением роликов колес, способных свободно вращаться и совершать плоское движение при помощи блока *Spatial Contact Force*.

Через блоки *World Frame*, *Cartesian Joint* и *Rigid Transform* заданы положение и начальные координаты установки отдельных элементов робота. Блок *Revolute Joint* позволил осуществить пространственную ориентацию всех элементов.

При помощи блоков *File Solid* в программу импортирована параметрическая пространственная модель мобильного робота, проанализированная авторами в статьях [7, 9], состоящая из отдельных компонентов: корпуса робота, ободов, ступиц и роликов колес, элементов подвески и сенсоров. Модели объектов составлены с учетом их геометрии и габаритов, указанных во введении, и материалов, аналогичных применяемым при создании роботов. Помимо геометрических параметров в блоке задаются также физические характеристики компонента, такие как масса и момент инерции. Такой подход позволил, во-первых, провести моделирование с учетом реальных геометрических параметров объекта, а во-вторых, получить анимацию траектории движения робота по результатам отработки задающего воздействия.

В модели используются радиус колеса, геометрические данные платформы и начальное пространственное положение робота в качестве его исходных параметров. Управление может быть реализовано либо через задание кинематических переменных, либо с помощью определенного закона. Сигналами управления являются напряжения, подаваемые на двигатели колес, пропорциональные скорости каждого колеса (или центра масс робота). Контур

обратной связи с ПИ-регулятором скорости (коэффициент пропорциональной составляющей 0,02, интегральной – 0,2) в динамической части – электроприводах колес робота поддерживает постоянную угловую скорость их вращения. Фильтрация сигналов скорости происходит через инерционное звено 1-го порядка, сглаживающее колебания и вибрации при движении.

В рамках исследования динамики голономного робота на колесах меканум произведено моделирование движения объекта на плоскости в трехмерной системе координат *XYZ* по прямолинейной траектории в течение 8,5 с со следующими участками движения: трогание на протяжении 1 с, равноускоренное движение (разгон) с ускорением 0,115 м/с<sup>2</sup> на протяжении 2 с, равномерное движение со скоростью 0,23 м/с (5 рад/с для каждого колеса) в течение 2 с, равнозамедленное движение (торможение) с ускорением минус 0,115 м/с<sup>2</sup> в течение 2 с до нулевой скорости, полная остановка на протяжении 1,5 с.

### Результаты моделирования, их анализ и оценка

Проведенное моделирование режима движения, описанного в предыдущем абзаце, позволило выявить и проанализировать ряд зависимостей кинематических, механических и динамических переменных в процессе отработки роботом заданного перемещения. В частности, полученные графики зависимостей угловых скоростей колес от времени  $\omega_N = f(t)$  (рис. 6a) и вращающих моментов колес от времени  $M_N = f(t)$  (рис. 6b) свидетельствуют о том, что робот отработал установленное нелинейное задание скорости с определенной точностью.

На рис. 6a пунктиром обозначено задающее трапецеидальное воздействие скорости на каждое колесо. График демонстрирует, что каждое колесо совершило отработку перемещения по одному и тому же закону и достигло скорости 5 рад/с к моменту равномерного движения. Инерционность системы сказывается на нелинейном характере графиков с запаздыванием по отработке воздействия: разгон начался через 0,4–0,7 с после поступления сигнала задания, торможение – спустя 0,2 с, полная остановка – от 0,2 с для задних колес до 0,4 с для правого переднего колеса и 1,1 с для левого переднего колеса.

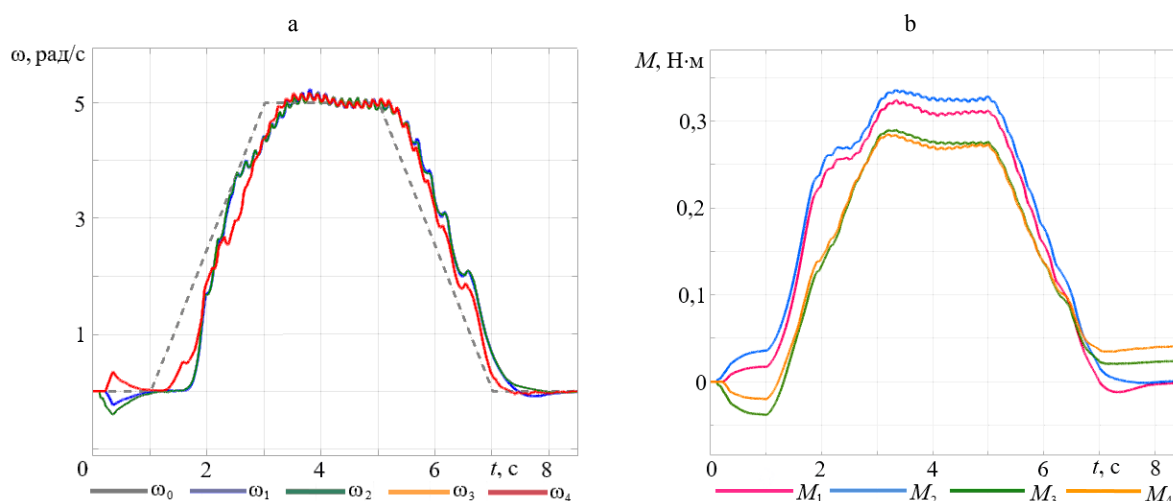


Рис. 6. Графики зависимостей: а – угловых скоростей колес от времени  $\omega_N(t)$ ;  
 б – вращающих моментов колес от времени  $M_N$

Fig. 6. Graphs of dependences: а – angular speeds of wheels on time  $\omega_N(t)$ ;  
 б – wheels torques on time  $M_N(t)$

Также присутствуют броски скорости при пуске, достигающие  $\pm 0,4$  рад/с, связанные с троганием, и заметные колебания скорости ( $\pm 0,2$  рад/с) при равномерном движении, возникшие из-за конструкции колес меканум – отсутствия полного непрерывного контакта с поверхностью за период оборота [10]. Графики зависимостей вращающих моментов колес от времени (рис. 6б) повторяют форму графиков скорости, но с заметными отличиями: передние колеса развивают больший момент ( $M_1 = 0,32$  Н·м;  $M_2 = 0,33$  Н·м), чем задние ( $M_3 = 0,27$  Н·м;  $M_4 = 0,275$  Н·м). Это свидетельствует о создании тормозного момента задними колесами, а в момент трогания задние колеса и вовсе создают отрицательный момент ( $-0,02$  и  $-0,04$  Н·м), после остановки – сохраняют вращающий момент ( $0,025$  и  $0,04$  Н·м) при нулевой скорости движения. Разность значений моментов колес означает, что робот отклоняется от прямолинейной траектории при движении, однако устойчив по скорости за счет внедренных ПИ-регуляторов скорости. Кинематическое управление заданием закона изменения скорости без возможности контроля динамики робота, очевидно, снижает точность позиционирования объекта, но алгоритмы контроля динамического уровня вынуждают использовать более сложные математические модели системы [11, 12].

Анимация движения робота по прямолинейной траектории с записанной траекторией его перемещения получена через инструмент *Mechanics Explorer* и отображена на рис. 7.

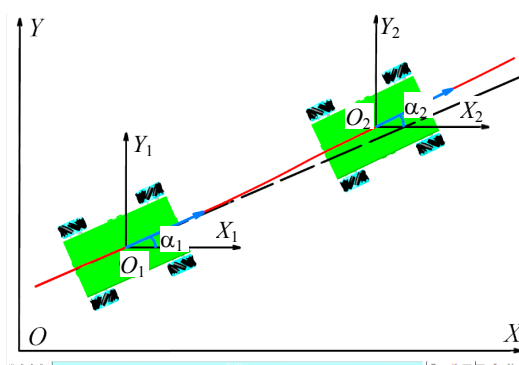


Рис. 7. Анимация движения робота по прямолинейной траектории с фактическим отклонением

Fig. 7. Animation of robot moving along a straight-line trajectory with actual deviation

Показанная на рис. 7 визуализация движения демонстрирует практически линейную траекторию перемещения с некоторым отклонением положения корпуса робота от начального в конце моделирования. Движение плоское в координатных осях  $OXY$  содержит перемещение робота из точки с координатами  $O_1X_1Y_1$  в точку с координатами  $O_2X_2Y_2$  по заданной прямолинейной траектории, обозначенной пунктирной линией черного цвета. Фактически пройденная роботом траектория, изображенная сплошной

линией красного цвета, показывает отклонение при движении, определяемое разностью углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$ . Суммарное перемещение робота составило 0,97 м за время 8,5 с, а его отклонение от прямолинейной траектории на угол  $\Delta\alpha = 1,68^\circ$  заставило отклониться от заданной прямой на 0,057 м. Это дает основания полагать о наличии ошибки позиционирования, возникшей по итогу действия кинематики и динамики колес механум при разгоне и торможении.

Рассмотрим проекции линейной скорости центра масс робота в трехмерной плоскости перемещения  $XYZ$ , отображающие действие случайных колебаний, вызванных динамикой механум колес, способствующих отклонению корпуса робота от намеченной траектории (рис. 8а, б, с).

Отображенная на рис. 8а зависимость линейной скорости центра масс робота в плоскости  $X$ , то есть в плоскости движения робота, совпадает с графиками скоростей колес (рис. 6а) и является результирующим вектором линейной скорости всех четырех колес. При торможении заметны более резкие скачки скорости, чем при разгоне, связанные с неодинаковыми значениями моментов к началу торможения. На рис. 8б показаны колебания скорости в плоскости  $Y$ , перпендикулярной направлению движения робота. Хотя показания величины скорости, имеющей случайный характер распределения, находятся в основном в пределах от  $-0,01$  до  $0,01$  м/с, резкое увеличение амплитуды гармоник скорости на промежутке от 3 до 7 с, когда робот совершает равномерное и равнозамедленное движение, достигающих своего пика на отметке  $-0,051$  м/с

на 6,7 с (в момент торможения), означает, что именно в этих режимах происходит наибольшее отклонение робота от своей траектории. Необходима лучшая фильтрация сигнала скорости за счет подбора более оптимальных коэффициентов апериодического звена, а также применение контура регулирования динамического момента и контроля динамических параметров. Отображенный на рис. 8с график зависимости линейной скорости робота в плоскости  $Z$  показывает колебания, влияющие на его движение со стороны поверхности. При трогании замечен резкий скачок скорости до значений  $-0,9$  и  $0,22$  м/с. Затем, по мере разгона, число колебаний возрастает и устанавливается в диапазоне  $\pm 0,08$  м/с в течение 2–6 с, к концу торможения вновь падает. Данные колебания объясняются профилем поверхности колеса механум, не имеющего непрерывного контакта с поверхностью из-за наличия повернутых на угол  $45^\circ$  роликов, в результате чего с ростом скорости колебания этого параметра становятся все более существенными.

Аналогичным образом проанализируем проекции перемещения робота в трехмерной плоскости  $XYZ$  и определим отклонения в позиционировании, основываясь на рис. 9а, б, с.

Как видно из графика на рис. 9а, робот совершил перемещение 0,97 м за 6,8 с, пройдя этапы разгона, равномерного движения и торможения. На протяжении времени от 6,8 до 8,5 с робот находился в состоянии покоя. Кривая, представленная на рис. 9б, является графиком перемещения, которое совершил робот в плоскости, перпендикулярной плоскости движения, иными словами, ошибкой его позиционирования.

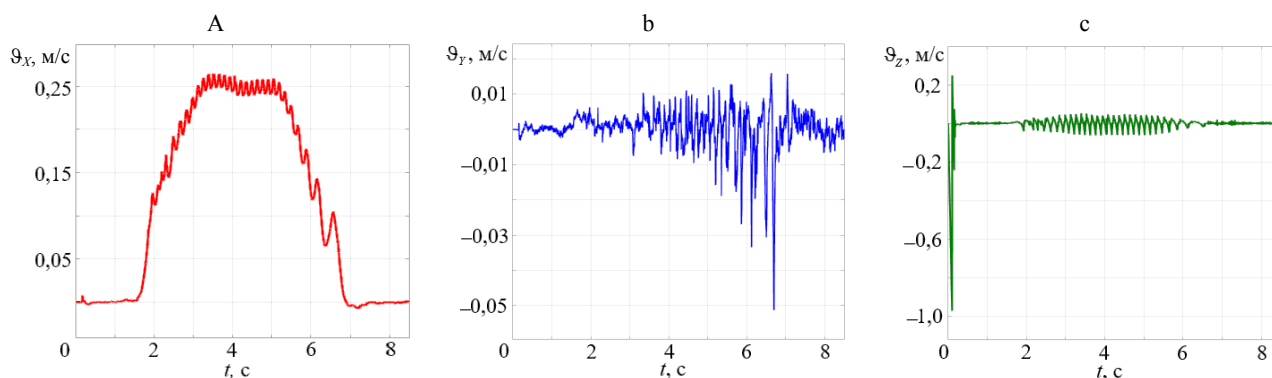


Рис. 8. Графики зависимостей проекций линейной скорости центра масс робота от времени на плоскость:

а –  $X \vartheta_X(t)$ ; б –  $Y \vartheta_Y(t)$ ; в –  $Z \vartheta_Z(t)$

Fig. 8. Graphs of projections of linear velocity of the robot's center of mass on time to the plane:

а –  $X \vartheta_X(t)$ ; б –  $Y \vartheta_Y(t)$ ; в –  $Z \vartheta_Z(t)$

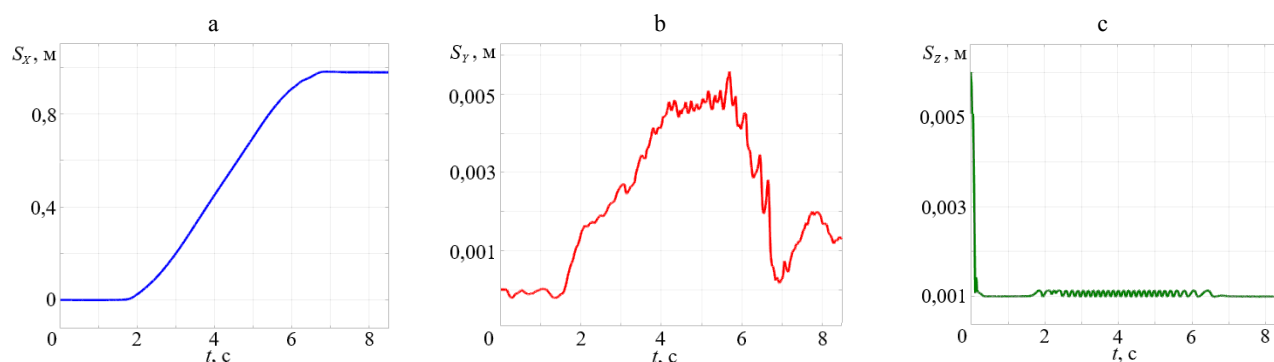


Рис. 9. Графики зависимостей проекций перемещения робота от времени на плоскость:

a –  $X S_X(t)$ ; b –  $Y S_Y(t)$ ; c –  $Z S_Z(t)$

Fig. 9. Graphs of projections of the robot's movement on time to the plane:

a –  $X S_X(t)$ ; b –  $Y S_Y(t)$ ; c –  $Z S_Z(t)$

Как и в случае с графиком скорости (рис. 8b), отклонение при движении имело место на всем протяжении движения робота, начиная с разгона, и не прекратилось даже после его остановки. Это объясняется тем, что задние колеса продолжают создавать вращающий момент и пытаются сместить корпус робота в плоскости XY. Колебания скорости, создаваемые вибрацией колес механум при движении, неизбежно приводят к отклонениям расстояния в плоскости Z, кратковременной потере контакта с поверхностью и тряске робота (рис. 9c), где показано, что при разгоне и движении платформы со скоростью 0,23 м/с вибрации колес приводят к отрыву от поверхности на 0,1–0,4 см, при снижении скорости такие отклонения исчезают.

На рис. 10a выведена ошибка позиционирования робота на всем протяжении пути – зависимость проекции перемещения на плоскость X

от проекции перемещения на плоскость Y. Трехмерное представление колебаний скорости робота изображено на рис. 10b.

График ошибки позиционирования, показанный на рис. 10a, представляет зависимость перемещения робота по оси x от перемещения по оси y. Максимальное отклонение от заданной траектории составило 0,057 м в момент достижения роботом отметки 0,85 м при торможении. По отношению к общему пройденному пути ошибка перемещения составила 5,87 %. Изображенная на рис. 10b пространственная визуализация колебаний скорости робота выявляет случайный характер их размещения и отображает экстремумы, установившиеся на значениях – 0,051 и 0,28 м/с. В целом позиционирование робота при отработке заданной траектории можно оценить как удовлетворительное.

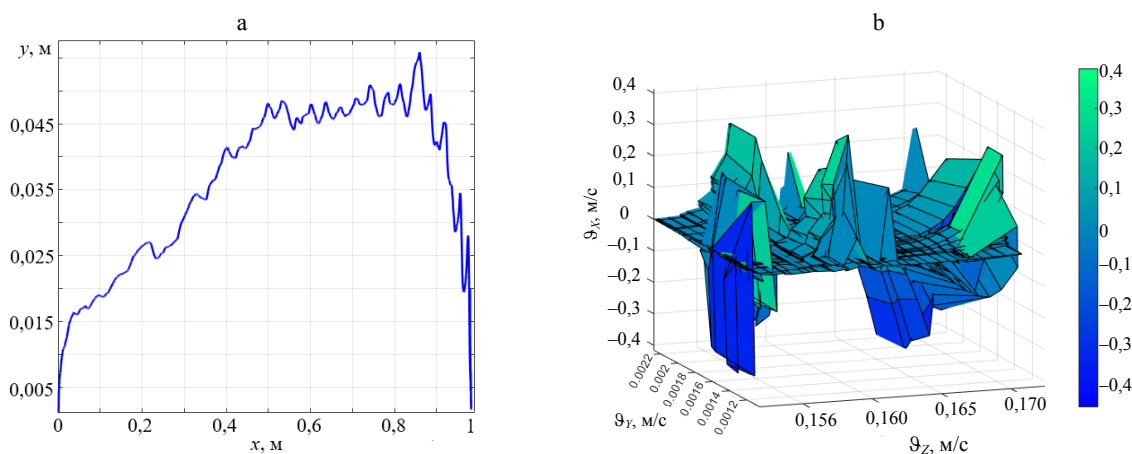


Рис. 10. Графики зависимостей: ошибки позиционирования робота  $x = f(y)$  (a)

и колебаний скорости робота в плоскостях XYZ  $\theta_{X,Y,Z}(t)$  (b)

Fig. 10. Dependency graphs: robot positioning errors  $x = f(y)$  (a) and robot speed fluctuations in XYZ planes  $\theta_{X,Y,Z}(t)$  (b)

## ВЫВОДЫ

Исследованы динамические характеристики мобильного всенаправленного робота с колесами меканум с применением имитационной модели, позволившей дать оценку, провести анализ и сделать выводы о свойствах и качествах системы.

1. В пакете моделирования MATLAB Simulink создана компьютерная модель робота на колесах меканум с применением технологий твердотельного цифрового прототипа, внедренного в модель, учитывающая массогабаритные параметры, а также кинематику и динамику объекта на основании блочной записи его математической модели.

2. Результатами проведенного моделирования явились полученные зависимости кинематических, динамических и механических характеристик: угловой скорости и вращательного момента каждого колеса от времени; линейной скорости центра масс робота от времени; пройденного роботом пути от времени; ошибки позиционирования при отработке заданного перемещения; пространственной визуализации колебаний скорости; получена анимация движения объекта по траектории.

3. В ходе проведенного анализа полученных графиков установлено:

- максимальная ошибка позиционирования 0,057 м (5,87 %), а угол отклонения робота от начального положения составил 1,68°;

- максимальные колебания скорости в перпендикулярной движению робота плоскости 0,051 м/с в процессе торможения;

- система устойчива по скорости благодаря внедренным ПИ-регуляторам скорости, однако в динамических режимах имеют место значительные пульсации скорости, что требует улучшенного механизма фильтрации;

- вращающий момент колес робота характеризуется разбегом характеристик, пульсациями величин и слабой устойчивостью из-за отсутствия контроля динамики робота (используется кинематическое управление заданием скорости), что снизило точность позиционирования объекта и повлияло на его отклонение от прямолинейной траектории.

4. Используемые в роботе колеса меканум из-за своей конструктивной особенности – рас-

положенных под углом 45° свободно вращающихся роликов – не могут обеспечивать непрерывный контакт с поверхностью, вследствие чего с увеличением скорости происходят колебания робота (тряска) с отклонением его от поверхности на 0,1–0,4 см и колебания скорости в вертикальной плоскости (вибрация) до  $\pm 0,08$  м/с. Данная особенность снижает устойчивость робота в динамике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов, А. В. Тележка с омниколесами на плоскости и сфере / А. В. Борисов, А. А. Килин, И. С. Мамаев // *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7, № 4. С. 785–801.
2. Адамов, Б. И. Исследование динамики всенаправленной платформы при различных уровнях детализации моделей меканум-колес и контактных сил / Б. И. Адамов, А. И. Кобрин, Г. Р. Сайпулаев // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. трудов: в 4 т. Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. Т. 1. С. 522–524.
3. Адамов, Б. И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot / Б. И. Адамов, А. И. Кобрин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. Т. 4, № 4. 2018. С. 251–258.
4. Изюмов, А. А. Моделирование системы управления движением мобильного робота / А. А. Изюмов // *Сборник избр. ст. науч. сессии ТУСУР*. 2020. № 1-1. С. 110–112.
5. Patel, P. S. Dynamic Simulation Model for Different Type of Wheeled Mobile Robotic Drives on Leveled Surface / P. S. Patel, R. Trivedi // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1706. P. 108–117. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012202>.
6. Li, Yu. Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn / Yunwang Li [et al.] // *Journal of Robotics*. Vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9373580>.
7. Радкевич, А. А. Математическая модель управления движением мобильного робота с колесами всенаправленного типа меканум / А. А. Радкевич [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2024. Т. 22, № 1. С. 82–90. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-82-90>.
8. Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels / R. Pizá [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 7. P. 3560 <https://doi.org/10.3390/app12073560>.
9. Павлюковец, С. А. К вопросу управления мобильным роботом с колесами всенаправленного типа / С. А. Павлюковец [и др.] // *BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics: сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17–18 мая 2023 г.: в 2 ч.* / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богущ [и др.]. Минск, 2023. Ч. 2. С. 94–102.

10. Abdelrahman, M. A Description of the Dynamics of a Four-Wheel Mecanum Mobile System as a Basis for a Platform Concept for Special Purpose Vehicles for Disabled Persons / M. Abdelrahman [et al.] // 58-th Ilmenau Scientific Colloquium – Shaping the Future by Engineering, Ilmenau, 2014.
  11. Hendzel, Z. Modeling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind / Z. Hendzel, J. Rykala // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 22, No 1. P. 81–99. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005>.
  12. Galati, R. Adaptive heading correction for an industrial heavy-duty omnidirectional robot / R. Galati, G. Mantriota, G. Reina // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, No 1. Art. No 19608. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24270-x>.
- Поступила 19.02.2024  
Подписана в печать 22.04.2024  
Опубликована онлайн 30.09.2024
- ## REFERENCES
1. Borisov A. V., Kilin A. A., Mamaev I. S. (2011) Trolley with Omni-Wheels on a Plane and a Sphere. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 7 (4), 785–801 (in Russian).
  2. Adamov B. I., Kobrin A. I., Sajpulaev G. R. (2019) Investigation of the Dynamics of an Omnidirectional Platform at Different Levels of Detail of Mecanum-Wheel Models and Contact Forces. *XII Vserossiiskii s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: sb. trudov. T. 1* [12<sup>th</sup> All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Collection of works. Vol. 1.]. Ufa, Bashkir State University, 522–524 (in Russian).
  3. Adamov B. I., Kobrin A. I. (2018) Parametric Identification of the Mathematical Model of the Omnidirectional Mobile Robot KUKA youBot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 4 (4), 251–258 (in Russian).
  4. Izyumov A. A. (2020) Simulation of a Mobile Robot Motion Control System. *Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR*, (1-1), 110–112 (in Russian).
  5. Patel P. S., Trivedi R. (2020) Dynamic Simulation Model for Different Type of Wheeled Mobile Robotic Drives on Leveled Surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706, 108–117. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012202>.
  6. Li Y., Dai S., Zheng Y., Tian F., Yan X. (2018) Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn. *Journal of Robotics*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9373580>.
  7. Radkevich A. A., Xinxin W., Velchenko A. A., Pauliukavets S. A. (2024) Mathematical Model of Motion Control of a Mobile Robot with Omnidirectional Mecanum Wheels. *Doklady BGUIR*, 22 (1), 82–90 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-82-90>.
  8. Pizá R., Carbonell R., Casanova V., Cuenca Á., Salt Llobregat J. J. (2022) Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels. *Applied Sciences*, 12 (7), 3560. <https://doi.org/10.3390/app12073560>.
  9. Pauliukavets S. A., Vel'chenko A. A., Sin'sin' U., Radkevich A. A., Savko N. O. (2023) On the Issue of Controlling a Mobile Robot with Omnidirectional Wheels. *BIG DATA and Advanced Analytics: Collection of Scientific Articles of the 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 17–18, 2023. Part 2*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 94–102 (in Russian).
  10. Abdelrahman M., Zeidis A. I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. (2014) Description of the Dynamics of a Four-Wheel Mecanum Mobile System as a Basis for a Platform Concept for Special Purpose Vehicles for Disabled Persons. *58-th Ilmenau Scientific Colloquium – Shaping the Future by Engineering*. Ilmenau.
  11. Hendzel Z., Rykala Ł. (2017). Modelling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels with the Use of Lagrange Equations of the Second Kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 22 (1), 81–99. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0005>.
  12. Galati R., Mantriota G., Reina G. (2022) Adaptive Heading Correction for an Industrial Heavy-Duty Omnidirectional Robot. *Scientific Reports*, 12 (1), 19608. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24270-x>.
- Received: 19.02.2024  
Accepted: 22.04.2024  
Published online: 30.09.2024

## Analysis and Implementation of Metamaterial-Inspired Microstrip Antenna for Wireless Applications

S. V. Pande<sup>1,3)</sup>, D. P. Patil<sup>2)</sup>, M. K. Sangole<sup>2)</sup>, S. Antonov<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Sandip Institute of Technology & Research Centre (Trambak road Nashik, India),

<sup>2)</sup>Sandip Institute of Engineering and Management (Trambak road Nashik, India),

<sup>3)</sup>SVKM's NMIMS Mukesh Patel School of Technology Management & Engineering (Shirpur, India),

<sup>4)</sup>Technical Univeristy of Sofia (Studentski Kompleks, Sofia, Bulgaria)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Abstract.** In this paper, a novel metamaterial-inspired microstrip antenna for wireless applications is proposed. The proposed design consists of a radiating path on top and a uniformly distributed split ring-shaped metamaterial structure on the ground. The presented antenna of 50×38 mm with a thickness of 1.6 mm is printed on FR<sub>4</sub> substrate and resonates at 1.80 GHz. The design was fabricated and the measured results were found to be in accordance with the simulations. The goal is accomplished by loading uniformly distributed split ring-shaped metamaterial structures on the ground plane of this antenna. The results of the experiments show that using the metamaterial structure on the ground plane improved gain from 4.34 to 7.3 dB, efficiency from 5.94 to 7.8 dB compared to the conventional patch antenna. This introduction in the ground plane exhibits return loss up to -38 dB and modified the gain and directivity to 7.3 and 7.8 dB respectively. The presented antenna has 45 MHz bandwidth. The presented design is proven by simulated surface current, S parameter, VSWR, radiation pattern. We have also investigated the effect of substrate permittivity, split width, and inter-element spacing in a split ring-shaped metamaterial structure on return loss. This directive antenna is designed for the applications of wireless local area networks and other Internet of things-based applications.

**Keywords:** metamaterial, directivity, gain, split ring

**For citation:** Pande S. V., Patil D. P., Sangole M. K., Antonov S. (2024) Analysis and Implementation of Metamaterial-Inspired Microstrip Antenna for Wireless Applications. *Science and Technique*. 23 (5), 370–379. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-370-379>

## Анализ и использование микрополосковой антенны на основе метаматериала для беспроводной связи

Асп. С. В. Панде<sup>1,3)</sup>, Д. П. Патиль<sup>2)</sup>, М. К. Санголе<sup>2)</sup>, С. Антонов<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Технологический институт и исследовательский центр Сандипа (Трамбак-роуд, г. Насик, Индия),

<sup>2)</sup>Сандипский институт инженерии и менеджмента (Трамбак-роуд, г. Насик, Индия),

<sup>3)</sup>SCVKM НМИМС Школа технологического менеджмента и инженерии имени Мукеша Пателя (г. Ширпур, Индия),

<sup>4)</sup>Софийский технический университет (Студенческий комплекс, София, Болгария)

**Реферат.** В данной статье предлагается новая микрополосковая антенна на основе метаматериалов, обеспечивающая беспроводную связь. Предлагаемая конструкция состоит из трассы распространения излученной волны, располагающейся сверху, и равномерно распределенной структуры метаматериала в форме расщепленного кольца, которая располагается на земле. Представленная антенна размером 50×38 мм, толщиной 1,6 мм напечатана на FR<sub>4</sub>-подложке

### Адрес для переписки

Дипак Пандуранг Патиль  
«Дип Амрит», Плот № 46+47/3  
Гаджанан Чоук,  
Индранagri, Каматваде  
Нашик, Индия  
Пин код – 422008  
E-mail: dipak.patil@siem.org.in

### Address for correspondence

Dipak Pandurang Patil  
“DEEP AMRIT”, Plot No 46+47/3  
Gajanan Chowk,  
Indranagri, Kamatwade  
Nashik (MS), India  
Pin Code – 422008  
E-mail: dipak.patil@siem.org.in

и резонирует на частоте 1,80 ГГц. Антенна данной конструкции была изготовлена, а полученные результаты измерений соответствуют ранее смоделированным. Цель достигается за счет загрузки равномерно распределенных структур метаматериала в форме разрезных колец на заземленную плоскость этой антенны. Результаты экспериментов показывают, что использование конструкции из метаматериала на заземленной плоскости позволило улучшить усиление сигнала с 4,34 до 7,3 дБ, эффективность с 5,94 до 7,8 дБ по сравнению с обычной патч-антенной. Предложенное нововведение в экран антенны позволяет свести обратные потери до –38 дБ, а также улучшить значения коэффициента усиления антенны и коэффициента ее направленности до 7,8 и 7,8 дБ соответственно. Представленная антенна имеет полосу пропускания 45 МГц. Предлагаемая конструкция апробирована с помощью смоделированного поверхностного тока, параметра S, VSWR (коэффициент стоячей волны напряжения), диаграммы направленности антенны. Авторы также исследовали влияние диэлектрической проницаемости подложки, ширины разделения и межэлементного расстояния в структуре метаматериала в форме расщепленного кольца на обратные потери. Предлагаемая направленная антенна предназначена для приложений беспроводных локальных сетей, а также других приложений в Интернете.

**Ключевые слова:** метаматериал, коэффициент направленности, коэффициент направленного действия, разъемное кольцо

**Для цитирования:** Анализ и использование микрополосковой антенны на основе метаматериала для беспроводной связи / С. В. Панде [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 370–379. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-370-379>

## Introduction

Printed antennas have been in demand in recent years, and this demand attracts global researchers around the world to work on microstrip antennas and produce significant results in response to the growing demand. Other Internet of Things (IoT)-based applications and wearable technologies are now using microstrip antennas, expanding their use beyond WLAN and satellite communication.

Researchers have applied available techniques to improve antenna parameters such as resonating frequency, return loss, bandwidth, VSWR, gain, and radiation pattern in recent years. Among them, metamaterial seems to be the most promising technique available.

In recent years, metamaterial has emerged as the most promising technique, prompting extensive research on its potential to improve antenna parameters. Stu Wolf and Valerie Browning from the DARPA Defense Advanced Research Projects Agency highlight that Metamaterial Technology (MTM) represents an innovative category of anticipated combinations that exhibit exceptional features not observed in the environment. These features come from qualitatively novel response tasks that are not found in element materials and are the result of extrinsic, short, artificial homogeneities.

There is no particular definition available, that is universally accepted, but generally, it is defined as a structure that contains some unusual properties that are not found in nature [1, 2].

Metamaterials have properties that don't come from the materials themselves, but rather from the structures they are made of. Their shape, size, orientation, and arrangement make them smart enough to manipulate electromagnetic waves in ways that go beyond what is not possible with regular materials. To get benefits, they can enhance, block, or even absorb bending waves.

Recently reduction in radar cross-section was achieved by implementing polarization conversion metamaterial [3], metamaterial could be the combination of variously shaped structures, it may contain only a split and a thin wire as a combination or it can be a group of SRRs [4–6].

Printed antenna with slots on the ground plane has also been trending along with the metamaterial [7–10], as this is also the effortless technique available to modify the antenna parameters.

Ref [11] presents an MTM-based magneto dielectric structure that helps in miniaturization. The given antenna has problems, particularly its complex construction and its inability to improve antenna parameters. This presented work includes a modification of the patch antenna utilizing the SRR metamaterial structure on the ground plane, which significantly enhances antenna parameters.

Due to the compact design of MPA, it attracts researchers to match the requirements of communication equipment [12]. The authors have proposed a wide range of metamaterial structures so far. Parameter enhancement after implementing metamaterial is achieved [13].

Ref [14] describes RMPA resonating at 1.8 GHz. The antenna's electrical dimension is 51×73 mm. The presented antenna in this paper is smaller than

the stated antenna. Incorporating a metamaterial on the ground plane offers higher gain enhancement and compactness in comparison to previously published antennas.

In Ref [15], it has been demonstrated that patch antennas can be reduced in size by incorporating metamaterial structure on the ground plane. Using metamaterial, return loss, size reduction are achieved.

A lower dielectric constant and a thicker substrate improve the antenna's performance by providing a larger bandwidth, improved radiation, and increased efficiency. If the substrate is thin, then it increases the size of the antenna [16]. We use a substrate with a higher dielectric constant, which consequently reduces bandwidth and efficiency. Hence, there is a tradeoff between antenna dimensions and antenna performance.

Ref [17] tried to reduce the antenna size. Despite achieving some miniaturization, the reported antenna gain remains extremely low. It may be challenging to decrease the size of the antenna in an existing system while maintaining a high gain.

There have been numerous reports of microstrip patch antennas with reduced sizes. Various techniques such as Metamaterial loaded patch [18–19], Minkowski and Koch Fractal [20], Shorting pin [21], CLRH transmission line [22], and Defected Ground Structure [23–26] were used to miniaturize the antenna.

For WLAN applications, a small patch that incorporates the  $\lambda/4$  resonator has been presented in [27] for improving the bandwidth and gain of the antenna. The antenna's electrical dimensions are  $40 \times 30 \text{ mm}^2$ . This method did not significantly enhance the gain compared to the proposed antenna in this paper.

Over the past few years, demand for highly efficient and compact antennas has steadily increased. A small and cheap antenna has always been favorable. The proposed study will implement SRR metamaterial on the ground plane to minimize the size of patch antennas. This implementation reduces the antenna size while improving gain and return loss.

The design process includes geometrical design, calculation, simulation, and comparison of results with or without MTM. The CST 2018 Microwave Studio serves as a tool for design and

simulation. The first step in the modeling process is to determine its dimensions based on the operating frequency. After designing and comparing it with the measured demand, we will determine whether the proposed antenna fulfills all the desired characteristics or not. If not, we will proceed with further modifications. The focus will be on providing a small, tunable antenna.

This paper proposes the use of a novel metamaterial structure. This proposed work involves a modification of the patch antenna using the metamaterial structure on the antenna's ground plane. This introduction not only improved the antenna's return loss but also increased the BW, gain, and directivity. This paper presents a directive antenna with improved return loss, increasing a return loss of  $-38 \text{ dB}$  and modifying gain and directivity to  $7.3$  and  $7.8 \text{ dBi}$ , respectively. This antenna is suitable for wireless applications.

We have divided this paper into the following sections: The second section discusses motivation. Section 3 introduces antenna geometry and construction. Section 4 presents a parametric analysis. Section 5 presents the simulation and measurement results, along with a comparison of other published literature. In Section 6, we present the conclusion.

## Motivation

Motivations come from the in-depth literature review, which shows that the need for smaller, smarter, and cheaper products has emerged, and the demand has been on the rise for several years. At microwave frequencies, MPA is very attractive because of its various advantages, such as its low profile, low weight, and low cost.

There is a lot of research being done on antennas for radio amateur communication and other portable applications. As a result, it proves that MPA generates good-quality radiation, but patch elements have the disadvantage of low gain. In recent years, researchers have applied available techniques to improve antenna parameters such as resonating frequency, return loss, bandwidth, VSWR, gain, and radiation pattern. Microstrip antennas are the most cost-effective option for meeting such demands due to their fabrication process, which is largely dependent on printed circuit technology. Additionally, they are smaller than

other antennas. Furthermore, they are very thin, making them compatible with integrated circuit technology. In recent years, metamaterial has emerged as the most promising technique, attracting research to enhance antenna parameters.

### Design of Patch antenna loaded with MTM

We designed a microstrip patch using an FR4 (lossy) substrate with a dielectric constant of and a width of 1.6 mm. We designed this antenna for a wide range of WLAN applications. Strip fed was used in the design of this proposed antenna. The simulation was done on CST Version 2018 and then results were analyzed.

The following Mathematical equations are used to approximate patch antenna design [28–30], unit cell SRR:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}; \quad (1)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}}; \quad (2)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L; \quad (3)$$

$$\Delta L = h(0.412) \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{h}{W} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{h}{W} + 0.8 \right)}; \quad (4)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} = \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}. \quad (5)$$

Based on the above calculations, using a permittivity of 4.4 & thickness of 1.6 mm, the presented antenna design on frequency 1.8 GHz requires a size of 50 mm width, 38 mm length. In this paper, we present an antenna that resonates at 1.8 GHz. Fig. 1 shows the proposed patch, all the dimensions are in mm.

The proposed rectangular patch consists of a 50×38 mm. After designing this patch, a simulation was done and the results were analyzed. The optimized dimensions of the designed rectangular patch (Patch I) are as follows (in mm) as shown in Table 1.

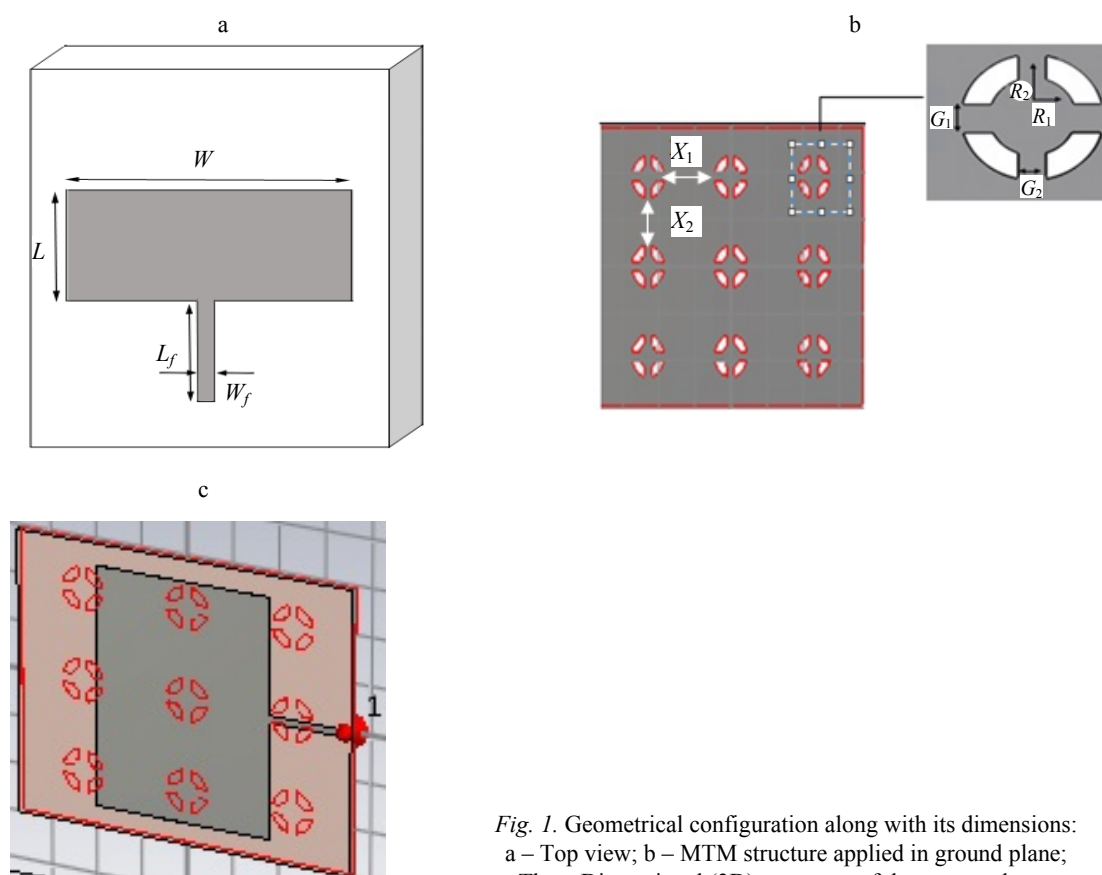


Fig. 1. Geometrical configuration along with its dimensions:  
a – Top view; b – MTM structure applied in ground plane;  
c – Three Dimensional (3D) prototype of the proposed antenna

Table 1

Dimensions of designed RMPA

| Parameter                        | Value (mm) |
|----------------------------------|------------|
| Patch's Width ( $W$ )            | 50         |
| Patch's Length ( $L$ )           | 38         |
| Substrate thickness ( $t_s$ )    | 1.6        |
| ground plane thickness ( $t_g$ ) | 0.036      |
| Width of Feed line ( $W_f$ )     | 1.5        |
| Dielectric constant of substrate | 4.3        |
| Length of Feed line ( $L_f$ )    | 16.5       |

After designing the conventional rectangular patch antenna, the metamaterial structure complies with SRRs [31–33] was implemented in the ground plane.

The Proposed SRR used in the MTM structure is shown in Fig. 1 (b).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9} = 0.1666 \text{ m}; \quad (6)$$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0.1666}{4} = 0.04165 \text{ m} = 41.65 \text{ mm}.$$

- Outer ring radius ( $R_2$ ): 4.5 mm.
- Inner ring radius ( $R_1$ ): 2.5 mm.
- Area of outer ring radius:  $\pi R_2^2 = 63.58 \text{ mm}^2$ .
- Area of Inner ring radius:  $\pi R_1^2 = 19.62 \text{ mm}^2$ .
- Area of the ring =  $(63.58 - 19.62) = 43.98 \text{ mm}^2$ .

Taking square root (in meter) = 6.63 mm.

So the design unit cell-driven MTM has size  $< \lambda / 4$ .

The dimensions of the proposed SRR used in the MTM structure as (in mm) shown in Table 2.

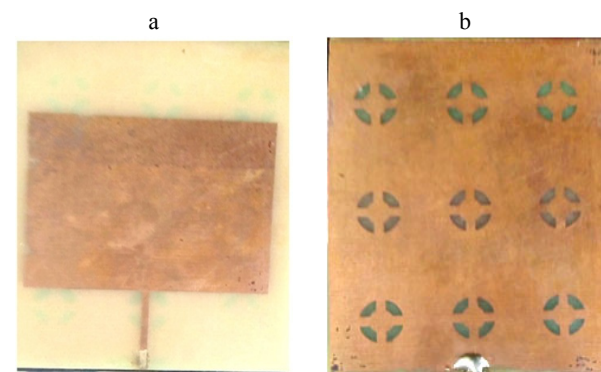


Table 2

Dimensions of proposed SRR

| Parameter                                                   | Value (mm) |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| Ring's inner radius ( $R_1$ )                               | 2.5        |
| Ring's outer radius ( $R_2$ )                               | 4.5        |
| Horizontal split gap ( $G_1$ )                              | 1.6        |
| Vertical split gap ( $G_2$ )                                | 0.036      |
| Distance of horizontal separation Between two SRR ( $X_1$ ) | 23         |
| Distance of Vertical separation Between two SRR ( $X_2$ )   | 19         |

After creating the initial SRR, a combination of these prototypes was combined and implemented. The proposed metamaterial structure, implemented in the ground plane of the antenna is presented in Fig. 1c. This proposed structure is the combination of 9 SRR separated with the distance of  $X_1 = 23 \text{ mm}$  and  $X_2 = 19 \text{ mm}$ .

A 3D model and geometry of the proposed antenna can be seen in Fig. 1a, b, and c. Fig. 2a–b shows the fabricated prototype on the FR4 substrate. Fig. 2c–e illustrates the design procedure during the development stages of Metamaterial Structures.

### Parametric Study

#### A) Effect of split width $G_1$ and $G_2$ on S parameter

This section explains the impact on S11 characteristics of the Antenna by varying various parameters of the unit cell on the ground plane.

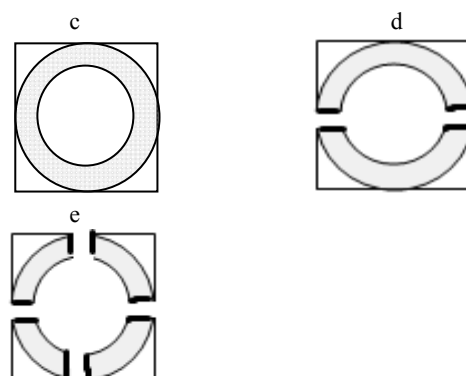


Fig. 2. a, b – Top and bottom view of the proposed fabricated antenna;  
c–e – Development stages of the proposed MTM Unit Cell

Fig. 3 shows a parametric study of the Width “ $G_1$ ” of the periodical split ring resonator designed on the ground plane and their impact on the S11 characteristics of the proposed antenna. Width is changed from 1 to 3 mm in a step of 1 mm. The effect of increasing the split width  $G_1$  decreases the capacitance which in turn increases the resonant frequency [ $G_1 = 1$  mm,  $F_r = 1.79$  GHz,  $G_1 = 2$  mm,  $F_r = 1.805$  GHz,  $G_1 = 3$  mm,  $F_r = 1.82$  GHz].

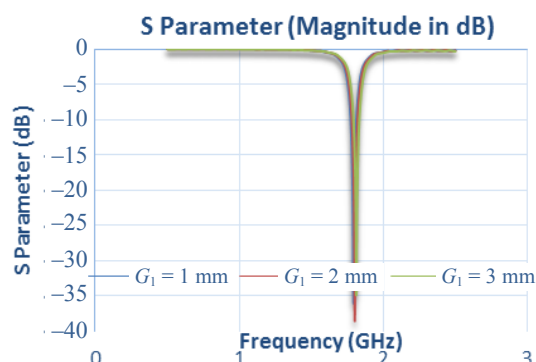


Fig. 3. S Parameter for different values of parameter “ $G_1$ ”

Fig. 4 shows the impact on the S11 characteristics of the antenna by varying the width “ $G_2$ ” of the periodical split ring resonator designed on the ground plan. We change the width from 1 to 3 mm in steps of 1 mm. In the proposed design, the introduction of the second split  $G_2$  connects the capacitance in series, leading to a decrease in the overall capacitance and an increase in the resonant frequency [ $G_2 = 1$  mm,  $F_r = 1.77$  GHz,  $G_2 = 2$  mm,  $F_r = 1.805$  GHz,  $G_2 = 3$  mm,  $F_r = 1.82$  GHz].

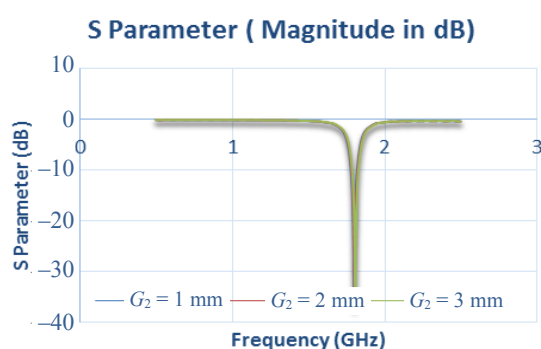


Fig. 4. S Parameter for different values of parameter “ $G_2$ ”

### B) Effect of inter-element spacing on S parameter

This section explains the impact of changing the metal width of the inner and outer ring on the S parameter. Increasing the metal width of the rings

decreases the mutual inductance as well as capacitance. Therefore SRR with narrow rings as shown in the Fig. 5 have smaller resonant frequencies.

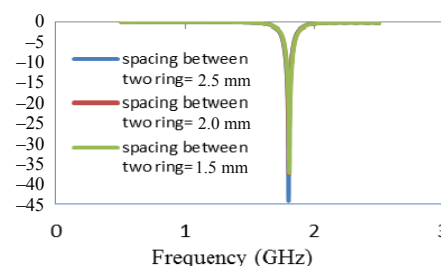


Fig. 5. Impact on S Parameter by changing Inter element spacing

### C) Effect of Substrate Permittivity on S Parameter

The impact on the S11 parameter by changing the substrate permittivity is shown in Fig 6. S11 parameter considering different permittivity's as Rogers RO3003 ( $\epsilon_r = 3$ ), FR4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ), Rogers RT6006 ( $\epsilon_r = 6.45$ ).

By increasing the substrate permittivity the resonant frequency shifts toward the lower side because it has an inverse relationship with permittivity ( $\epsilon_r$ ).

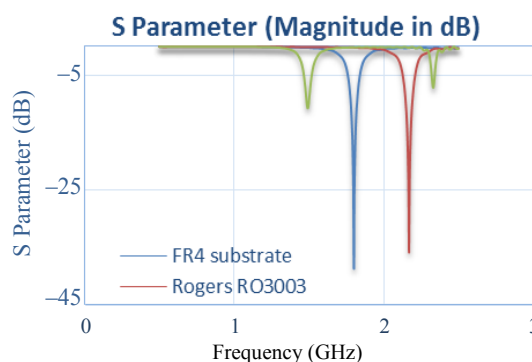


Fig. 6. The impact on the S11 parameter by changing the substrate permittivity

## Result and Discussion

We simulated the antenna design in CST version 18 to get the antenna performance analysis. The results are as follows.

### A. Frequency characteristics

Below, we present the surface current distribution and return loss, which aid in understanding the frequency characteristics of the proposed design antenna.

## I. Return loss

Fig. 7 shows the comparison of the reflection coefficient before metamaterial implementation and after metamaterial incorporation. After metamaterial inclusion, significant improvement was observed. We simulated and analyzed the proposed antenna with a novel metamaterial structure; the conventional antenna did not have parameters that could meet the demand.

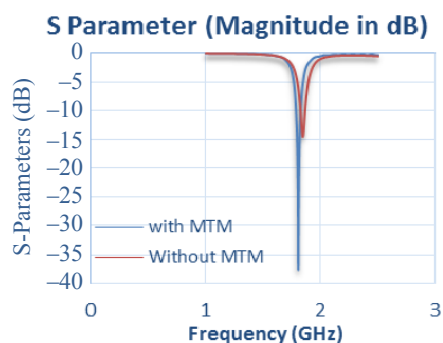


Fig. 7. Comparison of the reflection coefficient with and without MTM

To make it usable, amendments were required. After SRR implementation in the ground plane, the following Fig. 8 shows S11 variation during the development stages of MTM, focusing on three configuration ring with no cut, with one cut and double cut.

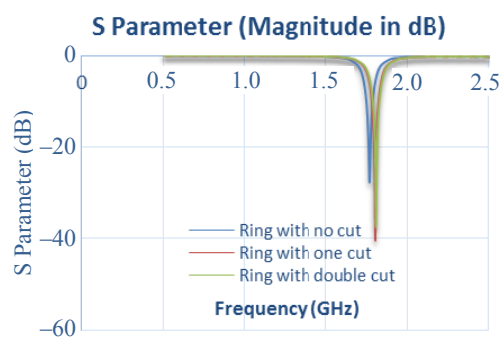


Fig. 8. S11 during the development stages of MTM

It can be observed that the Conventional proposed antenna has a return loss of  $-11$  dB whereas after metamaterial implementation having a return loss of  $-38$  dB shown in Fig. 7.

## II. Current distribution

Fig. 9 (a–b) shows the surface current distribution of the proposed antenna at 1.8 GHz.

## III. Radiation pattern

Fig. 10 shows the simulated radiation pattern of the presented antenna at different cut angles. Fig. 11a, b illustrates the 3D radiation pattern of a conventional patch antenna, showing gain and directivity, and Fig. 11c, d after metamaterial implementation at 1.8 GHz, showing gain and directivity.

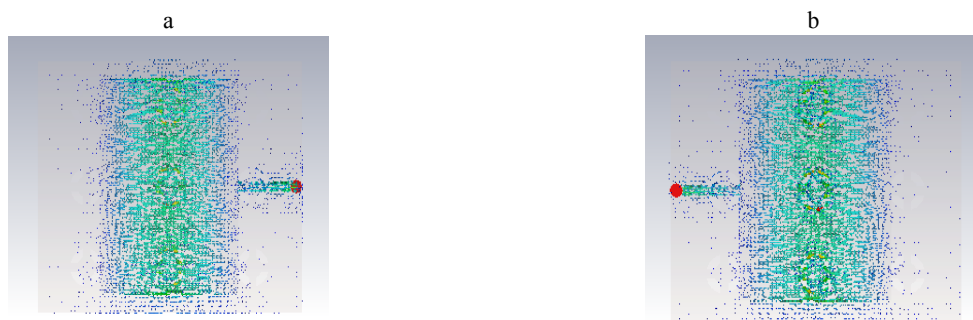


Fig. 9. Distribution of surface current in the proposed antenna (a) front (b) back

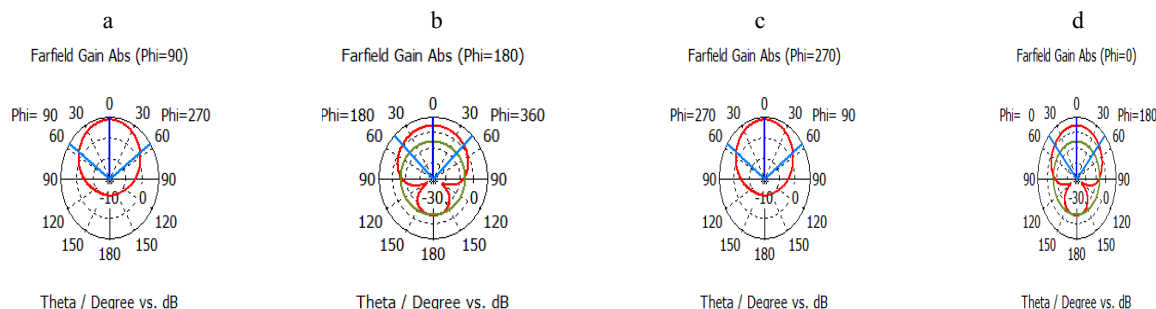


Fig. 10. Radiation pattern of the presented antenna at different cut angles: a – 90 degree; b – 180; c – 270; d – 0/360 degree

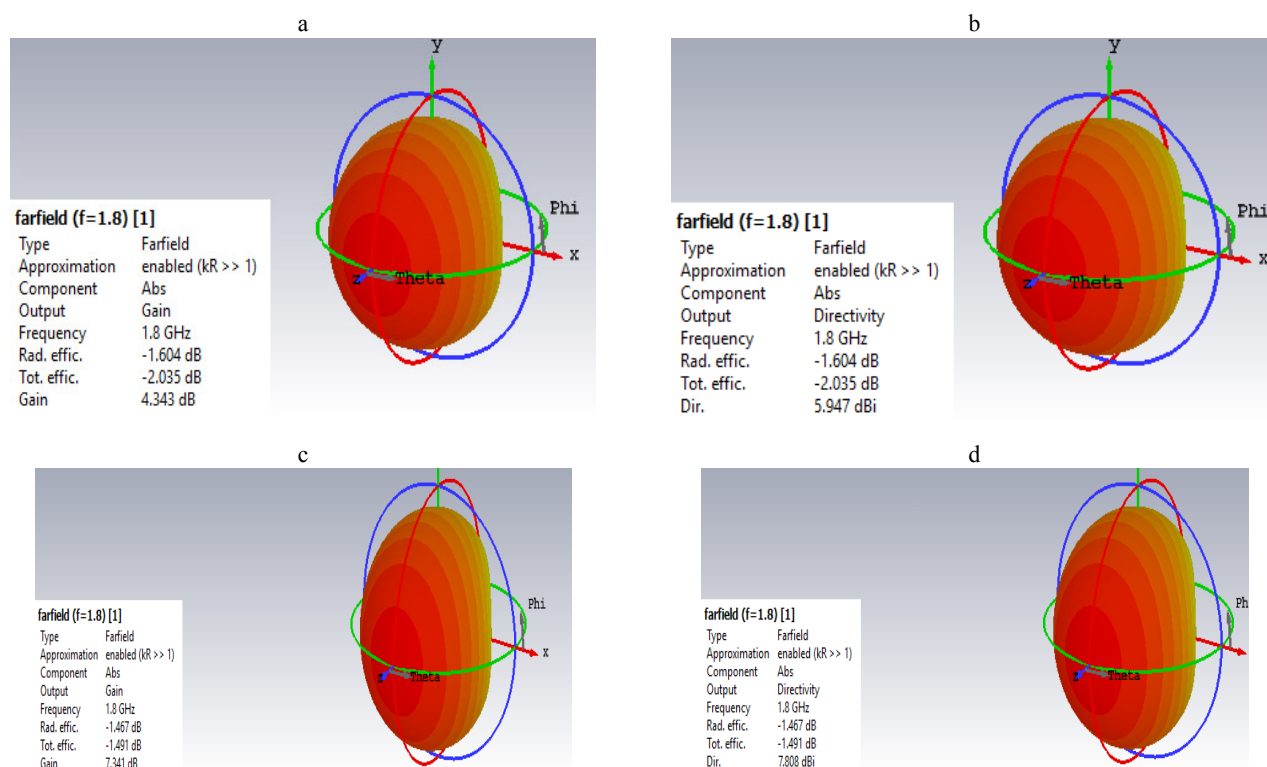


Fig. 11. Radiation pattern of conventional patch antenna showing gain and directivity (left side) and after Metamaterial Implementation (right side) at 1.8 GHz showing Gain & Directivity (c–d)

## B. Measured result

We have developed an antenna by loading a uniformly distributed split ring-shaped metamaterial on the ground plane resonating at 1.8 GHz for WLAN applications. We perform the measurement using the Portable Spectrum Analyzer Model TW4950. Fig. 12 shows a comparison of the simulated and measured return losses. The simulated and measured values of the gain are fairly close to each other.

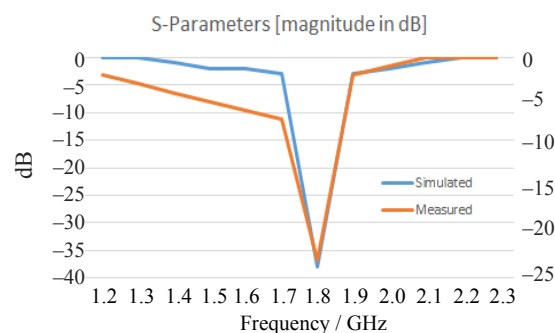


Fig. 12. Comparison of the simulated & measured return loss

Table 3

Illustrates the comparison between the performance of the presented MTM antenna to that of reference antennas [12, 16, 21–23, 25–27]. Compared with existing design, the presented antenna has better return loss, gain, directivity

| Ref. | Antenna Dimensions (mm) | Frequency (GHz) | Antenna Parameter |          |           |                  | Technique                                     |
|------|-------------------------|-----------------|-------------------|----------|-----------|------------------|-----------------------------------------------|
|      |                         |                 | Return Loss (dB)  | BW (MHz) | Gain (dB) | Directivity (dB) |                                               |
| 1    | 2                       | 3               | 4                 | 5        | 6         | 7                | 8                                             |
| [11] | 80×80                   | 1.8             | -17.5             | –        | –         | –                | Conventional FR <sub>4</sub> antenna          |
|      | 60×60                   |                 | -24               | 39       | 3.54      | –                | Metamaterial based Magneto dielectric antenna |
| [14] | 51×73                   | 1.8             | -15.61            | 43       | 4.39      | –                | Conventional Rectangular patch antenna        |

| 1                       | 2              | 3    | 4            | 5          | 6           | 7           | 8                                                                                                                |
|-------------------------|----------------|------|--------------|------------|-------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [15]                    | 51×38<br>41×28 | 1.8  | -22.5<br>-25 | –<br>–     | –<br>–      | –<br>5.45   | Traditional microstrip patch antenna<br>Array of 5 split ring resonators (SRRs)<br>unit cells                    |
| [17]                    | 30×30<br>24×24 | 1.76 |              | 25<br>50   | 2.11<br>-12 | –<br>–      | First Design – 2 parallel Interdigital capacitors.<br>Second design-interdigital capacitor and a spiral inductor |
| [34]                    | 49×12          | 1.8  | -23          | –          | -0.67       | –           | Electrically small antenna                                                                                       |
| [35]                    | 50×40<br>32×18 | 1.8  | -12<br>-34   | –<br>–     | –<br>–      | –<br>6.14   | Traditional RMPA<br>Substrate with left hand metamaterial                                                        |
| [36]                    | 40×40          | 1.76 | -14          | 35         | 5.4         | –           | antenna with CRLH loading                                                                                        |
| [37]                    | 23×58          | 1.76 | -19          | 27         | 6.4         | –           | MTM transmission line                                                                                            |
| <b>Proposed Antenna</b> | 50×38          | 1.8  | -11<br>-38   | 42.6<br>45 | 4.34<br>7.3 | 5.94<br>7.8 | Conventional patch alone<br>Array of 9 Split Ring Shaped Meta material Structure                                 |

## CONCLUSION

The proposed metamaterial structure, which has nine split-ring resonators on the ground plane of the conventional patch, implies that a metamaterial structure can significantly improve antenna characteristics. Modifications to the antenna structure's geometry alter the antenna's performance parameters, including resonating frequency, return loss, bandwidth, VSWR, gain, and radiation pattern. A comparison with the existing results and the conventional patch reveals an improvement in the parameter modification. The author noted that researchers could achieve promising results if they preferred metamaterials along with conventional methods.

## REFERENCES

1. Cao W., Zhang B., Liu A., Yu T., Guo D., Pan X. (2012) Multi-Frequency and Dual-Mode Patch Antenna Based on Electromagnetic Band-gap (EBG) Structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60 (12), 6007–6012. <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2211554>.
2. Metamaterials: The Complete Definition, History & Applications, 2016.
3. Liu Y., Hao Y., Li K., Gong S. (2016) Radar Cross Section Reduction of a Microstrip Antenna Based on Polarization Conversion Metamaterial. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 80–83. <https://doi.org/10.1109/lawp.2015.2430363>.
4. Pandeewari R., Raghavan S. (2015) Microstrip Antenna with CSRR Loaded Ground Plane for Gain Enhancement. *Micro-wave and Optical Technology Letters*, 57 (2), 292–296. <https://doi.org/10.1002/mop.28835>.
5. Hu J. R., Li J. S. (2014) Compact Microstrip Antennas using CSRR Structure Ground Plane. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56, 117–120. <https://doi.org/10.1002/mop.28023>.
6. Wang N., Zhang C., Zeng Q., Wang N., Xu J. (2013) New Dielectric 1D EBG Structure for the Design of Wideband Dielectric Resonator Antennas. *Process in Electromagnetic Research*, 141, 233–248. <https://doi.org/10.2528/pier13061207>.
7. Dastranj A., Imani A., Naser-Moghaddasi M. (2008) Printed Wide-slot Antenna for Wideband Application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56 (10), 3097–3102. <https://doi.org/10.1109/tap.2008.929459>.
8. Jan J.-Y., Su J.-W. (2005) Bandwidth Enhancement of a Printed Wide-Slot Antenna with a Rotated Slot. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53 (6), 2111–2114. <https://doi.org/10.1109/tap.2005.848518>.
9. Chen W.-L., Wang G.-M., Zhang C.-X. (2009) Bandwidth Enhancement of a Microstrip-line Fed Printed Wide-slot Antenna with a Fractal-Shaped Slot. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57 (7), 2176–2179. <https://doi.org/10.1109/tap.2009.2021974>.
10. See C. H., Abd-Alhameed R. A., Zhou D., Lee T. H., Excell P. S. (2010) A Crescent-Shaped Multiband Planar Monopole Antenna for Mobile Wireless Applications. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 9, 152–155. <https://doi.org/10.1109/lawp.2010.2044741>.
11. Goswami C., Pal M., Ghatak R., Poddar D. R. (2014) Metamaterial Based Miniaturized Dual Band Antenna. 2<sup>nd</sup> International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, 51, 1–4. <https://doi.org/10.1109/et2ecn.2014.7044956>.

12. Bhattacharya A. (2014) Modeling & Simulation of Meta material Based Devices for Industrial Applications. *Elektronika – Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, 1 (10), 68–71. <https://doi.org/10.15199/13.2016.10.17>.
13. Radavaram S., Pour M. (2019) Wideband Radiation Reconfigurable Microstrip Patch Antenna Loaded with Two Inverted U-Slots. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (3), 1501–1508. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2885433>.
14. Rambe A., Suherman S., Erwin E. (2019) Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna for 1.8 GHz Applications. *Proceedings of the Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Conference On Advance And Scientific Innovation, ICASI 2019*, 18 July, Banda Aceh, Indonesia. <https://doi.org/10.4108/eai.18-7-2019.2288555>.
15. Islam M. R., Adel A. A. A., Mimi A. W. N., Yasmin M. S., Norun F. A. M. (2017) Design of Dual Band Microstrip Patch Antenna using Metamaterial. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 260, 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/260/1/012037>.
16. Rop K. V., Konditi D. B. O. (2012) Performance Analysis of a Rectangular Microstrip Patch Antenna on Different Dielectric Substrates. *Innovative Systems Design and Engineering*, 3 (8), 1–14.
17. Rahimi M., Zarrabi F. B., Ahmadian R., Mansouri Z., Keshtkar A. (2014) Miniaturization of Antenna for Wireless Application with Difference Metamaterial Structures. *Progress in Electromagnetics Research*, 145, 19–29. <https://doi.org/10.2528/pier13120902>.
18. Jain S. K., Shrivastava A., Shrivastava G. (2015) Miniaturization of Microstrip Patch Antenna using Metamaterial Loaded with SRR. *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, a 87, 1224–1227. <https://doi.org/10.1109/iceaa.2015.7297313>.
19. Singh H. P. (2017) Design and Simulation of Rectangular Microstrip Patch Antenna Loaded with Metamaterial Structure. *Electrical & Electronic Technology Open Access Journal*, 1 (1), 58–62. Available at: <https://medcra veonline.com/EETOAJ/EETOAJ-01-00012.pdf>
20. Mishra G. P., Mangaraj B. B. (2020). Highly Compact Microstrip Patch Design based on Improved Capacitive Minkowski Fractal Defected Ground Structure. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 115, 153049. <https://doi.org/10.1016/j.aeu.2019.153049>.
21. Yang M., Chen Z. N., Lau P. Y., Qing X., Yin X. (2015). Miniaturized Patch Antenna with Grounded Strips. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 (2), 843–848. <https://doi.org/10.1109/tap.2014.2382668>.
22. Wqrner D. H., Ganguly S. (2003). An Overview of Fractal Antenna Engineering Research. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45 (1), 38–57. <https://doi.org/10.1109/map.2003.1189650>.
23. Suvarna K., Murty N. R., Vardhan D. V. (2019) A Miniature Rectangular Patch Antenna using Defected Ground Structure for Wlan Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 95, 131–140. <https://doi.org/10.2528/pierc19061602>.
24. Er-rebyiy R., Zbitou J., Latrach M., Tajmouati A., Errkik A., El Abdellaoui L. (2017). A Novel Design of a Miniature Low Cost Planar Antenna for ISM Band Applications. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computing and Wireless Communication Systems*, 99, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3167486.3167492>.
25. Ghaloua A., Zbitou J., El Abdellaoui L., Errkik A., Tajmouati A., Latrach M. (2017). A Miniature Circular Patch Antenna Using Defected Ground Structure for ISM Band Applications. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computing and Wireless Communication Systems*, 4, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3167486.3167571>.
26. Er-rebyiy R., Zbitou J., Latrach M., Tajmouati A., Errkik A., Abdellaoui L. E. (2017). New Miniature Planar Microstrip Antenna Using DGS for ISM Applications. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 15 (3), 1149. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v15i3.6864>.
27. Zhang H., Chen D., Yu Y., Zhao C., Tian G. (2019) A Novel Compact Microstrip Antenna with an Embedded  $\lambda/4$  Resonator. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/2431760>.
28. Balanis C. A. *Antenna Theory & Design*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
29. Pozar D. M. (2004) *Microwave Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons.
30. Stutzman W. L., Thiele G. A. (1998) *Antenna Theory & Design*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
31. Haupt R. L. (1995) An Introduction to Genetic Algorithms for Electromagnetic. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 37 (2), 7–15. <https://doi.org/10.1109/74.382334>.
32. Hamzidah N. K., Setijadi E. (2015) Design of Microstrip Patch Antenna Based on Complementary Split Ring Resonator Metamaterial for Wi-MAX Application. *2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 56, 413–418. <https://doi.org/10.1109/isitia.2015.7220016>.
33. Nutan R. A., Raghavan S. (2013) Split Ring Resonator and Its Evolved Structures over the Past Decade: This paper discusses the nuances of the most celebrated composite particle (split-ring resonator) with which novel artificial structured materials (called metamaterials) are built. *2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN)*. <https://doi.org/10.1109/ice-ccn.2013.6528575>.
34. Sharma S. K., Abdalla M. A., Hu Z. (2018) Miniaturisation of an Electrically Small Metamaterial Inspired Antenna using Additional Conducting Layer. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12 (8), 1444–1449. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0927>.
35. Sharma R., Singh H. (2015) Left Handed Metamaterial Antenna Design for GSM 1.8 GHz Applications. *2015 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, 2, 1–5. <https://doi.org/10.1109/raecs.2015.7453276>.
36. Segovia-Vargas D., Herraiz-Martinez F. J., Ugarte-Munoz E., Garcia-Munoz L. E., Gonzalez-Posadas V. (2013) Quad-Frequency Linearly-Polarized and Dual-Frequency Circularly-Polarized Microstrip Patch Antennas with CRLH Loading. *Progress In Electromagnetics Research*, 133, 91–115. <https://doi.org/10.2528/pier12072413>.
37. Niu J.-X. (2010). Dual-Band Dual-Mode Patch Antenna based on Resonant-Type Metamaterial Transmission Line. *Electronics Letters*, 46 (4), 266. <https://doi.org/10.1049/el.2010.3142>.

Received: 07.08.2023

Accepted: 10.10.2023

Published online: 31.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389>

УДК 621.791.754

## Технологические особенности плавления присадочной проволоки при дуговой сварке и наплавке с введением $SF_6$ в защитную газовую атмосферу

Канд. техн. наук, доц. А. О. Коротеев<sup>1)</sup>, Е. А. Фетисова<sup>1)</sup>,  
доктор техн. наук, проф. С. Г. Паршин<sup>2)</sup>, А. А. Коротеева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье на основании результатов экспериментальных исследований установлены важные закономерности зависимости частоты коротких замыканий дугового промежутка и коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание от напряжения на дуге и скорости подачи присадочной проволоки при сварке и наплавке с введением газообразного  $SF_6$  в защитную смесь  $Ar + CO_2$ . Предлагается вводить фторсодержащие компоненты  $SF_6$  непосредственно в защитную газовую смесь 82 %  $Ar + 18$  %  $CO_2$  в количествах, не превышающих 2 %. Технология позволяет снизить количество диффузионного водорода в наплавленном металле, что является актуальной задачей при сварке высокопрочных сталей и материалов, чувствительных к водородному охрупчиванию. Ранее нами был решен ряд вопросов, связанных с препятствием повышения концентрации  $S$  в наплавленном металле, что позволило определить наиболее эффективные концентрации  $SF_6$  в составе защитной газовой среды, ограниченные 1,5 % по объему от общего состава  $(Ar + CO_2) + SF_6$ . При этом модификация защитной газовой атмосферы галогенидным соединением  $SF_6$  оказывает существенное влияние на характеристики плавления электродной проволоки и температурные показатели в зоне горения дуги. Это обусловлено высоким потенциалом ионизации фтора как продукта высокотемпературной реакции диссоциации  $SF_6$ . Полученные результаты позволили определить наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима, а также исследовать специфику плавления присадочной проволоки в модифицированной  $SF_6$  защитной атмосфере. Установлены важные закономерности, раскрывающие технологические особенности сварки и наплавки с модификацией защитной атмосферы галогенидными соединениями.

**Ключевые слова:** дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, модификация защитной газовой среды, коэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание, частота коротких замыканий дугового промежутка

**Для цитирования:** Технологические особенности плавления присадочной проволоки при дуговой сварке и наплавке с введением  $SF_6$  в защитную газовую атмосферу / А. О. Коротеев [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 380–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389>

---

### Адрес для переписки

Коротеев Артур Олегович  
Межгосударственное образовательное учреждение  
высшего образования «Белорусско-Российский университет»,  
просп. Мира, 43,  
212000, г. Могилев, Республика Беларусь  
Тел.: +375 22 224-47-77  
[karatseyeu\\_artur@fastmail.com](mailto:karatseyeu_artur@fastmail.com)

### Address for correspondence

Karatseyeu Artur A.  
Inter-State Educational Institution  
of Higher Education «Belarusian-Russian University»  
43, Mira Ave.,  
220013, Mogilev, Republic of Belarus  
Tel.: +375 22 224-47-77  
[karatseyeu\\_artur@fastmail.com](mailto:karatseyeu_artur@fastmail.com)

## Technological Features of Filler Wire Melting for Arc Welding and Surfacing with the Introduction of SF<sub>6</sub> into Protective Gas Atmosphere

A. A. Karatseyeu<sup>1)</sup>, K. A. Fiatsisava<sup>1)</sup>, S. G. Parshin<sup>2)</sup>, A. A. Karatseyeva<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University” (Mogilev, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Abstract.** On the basis of the results of experimental studies the paper establishes important patterns of dependence of the frequency of short circuits of the arc gap and the coefficient of loss of electrode metal due to spatter from the voltage on the arc and the feed rate of the filler wire during welding and surfacing with the introduction of gaseous SF<sub>6</sub> into the Ar + CO<sub>2</sub> protective mixture. It is proposed to introduce fluorine-containing components of SF<sub>6</sub> directly into the protective gas mixture of 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> in quantities not exceeding 2 %. The technology makes it possible to reduce the amount of diffusion hydrogen in the deposited metal, which is an urgent task when welding high-strength steels and materials sensitive to hydrogen embrittlement. Previously, we resolved a number of issues related to the obstacle to increasing the concentration of S in the deposited metal, which made it possible to determine the most effective concentrations of SF<sub>6</sub> in the protective gas environment, limited to 1.5 % by volume of the total composition (Ar + CO<sub>2</sub>) + SF<sub>6</sub>. At the same time, modification of the protective gas atmosphere with the halide compound SF<sub>6</sub> has a significant effect on the melting characteristics of the electrode wire and temperature indicators in the arc combustion zone. This is due to the high ionization potential of fluorine as a product of the high-temperature dissociation reaction of SF<sub>6</sub>. The results obtained have made it possible to determine the most effective relationships between the values of the mode parameters, as well as to study the specifics of melting the filler wire in a protective atmosphere modified with SF<sub>6</sub>. Important regularities have been established that reveal the technological features of welding and surfacing with modification of the protective atmosphere with halide compounds.

**Keywords:** arc welding in shielding gases, shielding gas mixtures, modification of the shielding gas environment, coefficient of loss of electrode metal due to spattering, frequency of arc gap short circuits

**For citation:** Karatseyeu A. A., Fiatsisava K. A., Parshin S.G., Karatseyeva A. A. (2024) Technological Features of Filler Wire Melting for Arc Welding and Surfacing with the Introduction of SF<sub>6</sub> into Protective Gas Atmosphere. *Science and Technique*. 23 (5), 380–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-380-389> (in Russian)

### Введение

На сегодняшний день дуговая сварка в среде защитных газов является наиболее распространенным способом, используемым в промышленности для получения неразъемных соединений металлоконструкций из сталей и сплавов. Широкий ассортимент типов присадочных проволок позволяет сформировать требуемый комплекс эксплуатационных свойств сварного соединения, обеспечить его прочностные характеристики при высокой производительности и возможностях для механизации и автоматизации технологии.

В последнее время наблюдается практически полный переход на использование в качестве защитных газовых сред смесей на основе аргона (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, 95 % Ar + 5 % CO<sub>2</sub> и др.). Это позволяет не только улучшить технологические характеристики плавления присадочной проволоки, но и эффективно применить способ для сварки легированных сталей, так как окислительный потенциал защитной атмосферы существенно ниже, чем при сварке

в чистом CO<sub>2</sub>. Следует отметить, что защитная газовая среда при сварке традиционно выполняет две функции: вытеснение атмосферного воздуха из зоны горения дуги и создание необходимой атмосферы, обеспечивающей наиболее эффективное протекание сварочных процессов. В случае динамики перехода к инертным газовым средам практически отсутствует возможность металлургического воздействия на процессы, происходящие в зоне плавления проволоки и переноса расплавленного металла через дуговой промежуток. Преимущественно инертная среда не взаимодействует с жидким металлом. В таких условиях наличие в рабочей зоне загрязнений, продуктов металлургических реакций постороннего происхождения, инициирующих появление свободного водорода в атмосфере дуги, приводит к его интенсивному растворению в жидком металле. В отличие от способов сварки, использующих флюсы и покрытия электродов, содержащих большое количество элементов для обеспечения управляемого механизма металлургического воздействия, в рассматриваемой технологии возмож-

ности отсутствуют. Одним из решений является применение порошковых проволок, однако не всегда на предприятии имеется возможность использования дорогостоящих и сложных присадочных материалов.

Особенно чувствительными к водородному охрупчиванию являются высокопрочные стали. Это обусловлено снижением диффузионной подвижности водорода в сварном соединении после сварки в областях, имеющих структуры мартенсита и бейнита. Происходит практически полная его блокировка, препятствующая выходу на поверхность и способствующая созданию огромных внутренних давлений при повышении концентрации в областях микродефектов и микротрещин, раскрывающих их в конечном счете с выходом макротрещины на поверхность в течение некоторого времени. Это полностью выводит конструкцию из эксплуатации и требует исправления дефекта.

Описанный механизм позволяет предположить, что наиболее эффективным способом борьбы с диффузионным водородом в таких условиях является снижение его растворимости в металле сварочной ванны и присадочном материале на стадии плавления электродной проволоки. Такие подходы реализованы в способах сварки покрытым плавящимся электродом, порошковой проволокой, под флюсом и основаны на введении фторсодержащих компонентов в зону сварки (преимущественно  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{KF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{BaF}_2$ ). При использовании проволок сплошного сечения в инертных газовых смесях такие механизмы в традиционной практике не применяются.

В статье предлагается вводить фторсодержащие компоненты в виде газообразного  $\text{SF}_6$  непосредственно в защитную газовую смесь с соотношением компонентов 82 %  $\text{Ar}$  + 18 %  $\text{CO}_2$  в количествах 0,5–2 % при сварке и наплавке [1–10]. Эффективность такого способа, с точки зрения снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле, качественно установлена и показана нами ранее в ряде публикаций [6]. Также решен ряд вопросов, связанных с препятствием повышения концентрации серы в наплавленном металле, что по совокупности факторов позволило определить наиболее эффективные области концентрации  $\text{SF}_6$ , ограниченные 0,5–1,5 % по объему от общего состава защитной атмосферы ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ) +  $\text{SF}_6$  [1–7].

В статье приведены результаты исследования коэффициента потерь на разбрызгивание и частоты коротких замыканий дугового промежутка, определяющие основные технологические параметры процесса. В качестве присадочной проволоки использовалась проволока Св-08Г2С.

### Основная часть

Для способов сварки плавящимся электродом перенос электродного металла является одним из основных технологических процессов, определяющих эффективность применения технологии. На сегодняшний день, основываясь на длительной практике и большом объеме результатов исследований в этой области, считается, что наиболее предпочтительными видами переноса по совокупности параметров являются перенос короткими замыканиями дугового промежутка и так называемый «струйный».

Первый из них характеризуется относительно невысокими для конкретного типа и диаметра сварочной проволоки значениями силы тока. Вследствие невысокой мощности дугового разряда и скорости плавления проволоки капля расплавленного металла не отделяется от нее и приближается к поверхности расплавленной ванны вплоть до короткого замыкания дугового промежутка, что сопровождается резким скачком значения силы тока. Это приводит к перегреву и вскипанию жидкой перемишки между каплей и проволокой, стремительно уменьшающейся вследствие действия сжимающего эффекта магнитного поля, с выбросом части жидкого металла и возобновлением горения дуги. Отделившаяся капля за счет силы поверхностного натяжения переходит в сварочную ванну. Механизм и характер распределения сил, определяющих динамику протекания процесса, на сегодняшний день относительно хорошо исследован. При этом именно резкий скачок значения силы тока в момент короткого замыкания является характерным признаком отделения капли расплавленного металла при анализе осциллограмм процесса, что позволяет достаточно просто реализовать системы управления переносом электродного металла. Также следует отметить, что в последнее время все больше приветствуются тенденции использования «невысоких»

значений параметров режима, что обусловлено необходимостью ограничения тепловложения в основной материал с целью предотвращения потери легирующих элементов в дуговом промежутке, снижения внутренних напряжений в конструкции из-за неравномерного нагрева, выполнения сварного соединения за большее количество проходов так называемыми «ниточными» валиками. Это делает диапазон значений параметров режима, соответствующих переносу электродного металла короткими замыканиями, наиболее распространенным.

«Струйный» характер переноса электродного металла возникает при значениях силы тока, превышающих так называемое «критическое». В этом случае складывается ряд условий, при которых равнодействующая всех сил, действующих на каплю жидкого металла, направлена в сторону расплавленной ванны. Это приводит к вытягиванию жидкого металла по оси присадочной проволоки и его дроблению на мелкие капли, визуально сложно различимые и представляющие собой сплошной канал. Процесс достаточно стабилен и практически лишен потерь на разбрызгивание электродного металла. Вместе с тем требуется использование достаточно высоких значений силы тока (свыше 280–300 А для проволок диаметром 1,2 мм), что в ряде случаев может приводить к перегреву свариваемых деталей вследствие большого тепловложения, что ограничивает область эффективного применения

струйного режима на практике, особенно при сварке материалов, чувствительных к термическому циклу.

Переходным процессом является капельный перенос электродного металла, характеризуемый отрывом отдельных капель от торца проволоки до момента контакта с поверхностью расплавленной ванны. При этом они свободно перемещаются через дуговой промежуток. Процесс трудно контролируем, так как момент отделения капли от проволоки достаточно сложно зафиксировать и на практике применяется ограниченно.

Модификация защитной газовой атмосферы галогенидным соединением  $\text{SF}_6$  оказывает существенное влияние на характеристики плавления электродной проволоки, особенности дугового разряда, температурные показатели в зоне дуги. Это обусловлено в первую очередь высоким потенциалом ионизации фтора, как продукта высокотемпературной реакции диссоциации  $\text{SF}_6$ .

Исследование частоты коротких замыканий дугового промежутка и особенностей переноса расплавленного металла проводилось с применением методики анализа осциллограмм электрических параметров с совмещенной скоростной видеосъемкой при наплавке одиночных валиков на пластину. Внешний вид установки и получаемые кадры видеосъемки переноса представлены на рис. 1, 2.

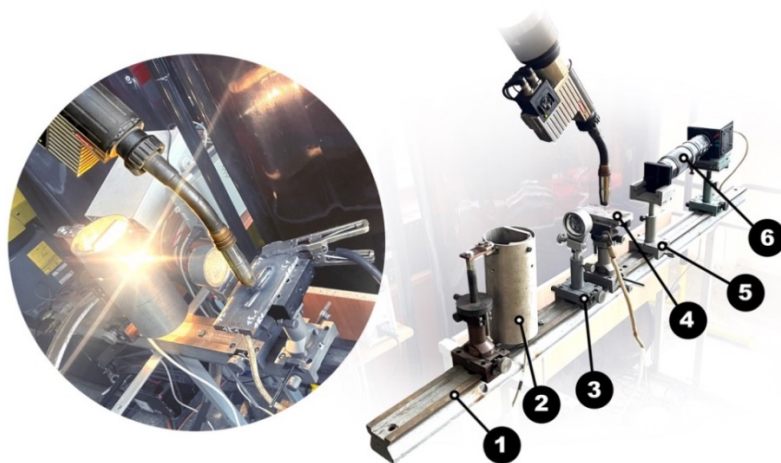


Рис. 1. Внешний вид установки для скоростной видеосъемки процесса переноса электродного металла:

- 1 – направляющая; 2 – система подсветки с лампой; 3 – линза; 4 – стол с образцом для наплавки;  
5 – система светофильтров; 6 – камера

Fig. 1. External view of the installation for high-speed video filming of the electrode metal transfer process:

- 1 – guiding system; 2- lighting system with a lamp; 3 – lens; 4 – table with a sample for surfacing;  
5 – light filter system; 6 – camera

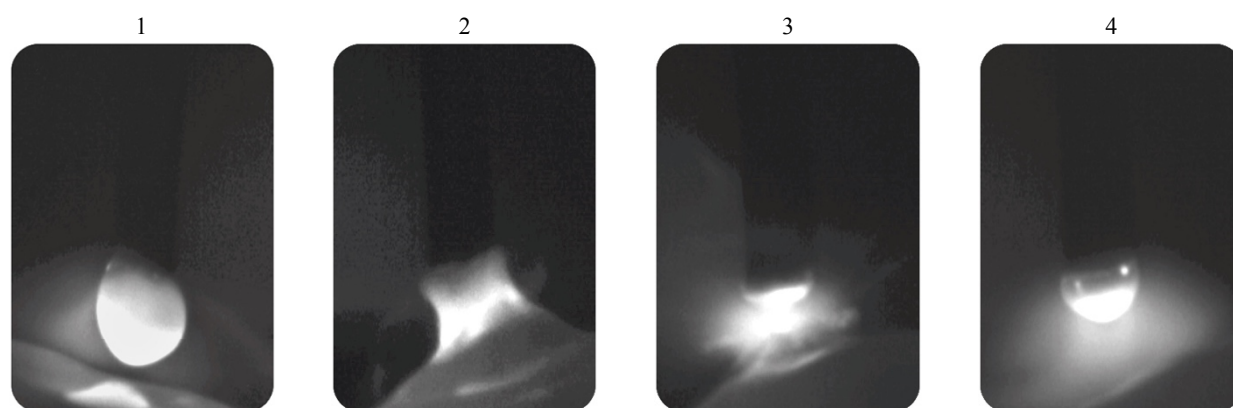


Рис. 2. Стадии переноса электродного металла: 1 – стадия формирования капли; 2 – короткое замыкание дугового промежутка; 3 – разрыв перемычки жидкого металла (возобновление горения дуги); 4 – стадия формирования капли

Fig. 2. Electrode metal transfer stages: 1 – stage of drop formation; 2 – short circuit of the arc gap; 3 – rupture of the liquid metal jumper (resumption of arc combustion); 4 – stage of drop formation

Для регистрации значений параметров режима при наплавке использовался регистратор РКДП-0401. Количество вводимого  $\text{SF}_6$  изменялось от 0 до 2 % при помощи специально разработанного нами устройства для смешивания [4], представленного на рис. 3. Применение для этих целей штатных смесителей неэффективно, так как количество вводимого  $\text{SF}_6$  невелико и требуется последовательное двухэтапное смешивание с уже готовой смесью 82 %  $\text{Ar}$  + 18 %  $\text{CO}_2$ .

Выбор и задание значений параметров режима осуществлялись через скорость подачи присадочной проволоки  $V_{\text{п.пр}}$  и напряжения на дуге  $U_{\text{д}}$ . При проведении экспериментальных исследований нами использовались пять вариантов значений скорости подачи: 2,3; 3,7; 5,3; 7,7; 9,2 м/мин. Первые три из них соответствуют области переноса электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и ограничиваются силой тока в диапазоне 100–200 А.

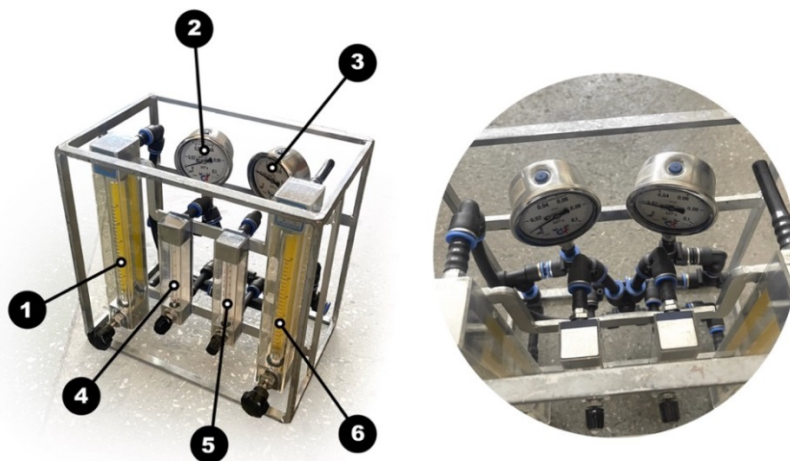


Рис. 3. Внешний вид наплавки, выполняемых в процессе проведения экспериментальных исследований: 1 – ротаметр для определения расхода смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  на вход смесителя; 2 – давление смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  на входе; 3 – давление  $\text{SF}_6$  на входе; 4 – ротаметр для определения расхода  $\text{SF}_6$  (диапазон значений до 3 %); 4 – ротаметр для определения расхода  $\text{SF}_6$  (диапазон значений до 6 %); 6 – ротаметр для определения расхода смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$  на выходе

Fig. 3. Appearance of surfacing performed during experimental research:

1 – rotameter for determining the flow rate of the  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  mixture at the inlet; 2 – pressure of the  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  mixture at the inlet; 3 –  $\text{SF}_6$  pressure at the inlet; 4 – rotameter for determining the  $\text{SF}_6$  flow rate (range of values up to 3 %); 4 – rotameter for determining  $\text{SF}_6$  consumption (range of values up to 6 %); 6 – rotameter for determining the flow rate of the  $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$  mixture at the outlet

В условиях постоянства скорости подачи изменение значения напряжения на дуге позволяет эффективно влиять не только на энергетические характеристики дугового разряда, но и изменить длину дуги, непосредственно оказав влияние на длительность существования дугового промежутка и ход протекания металлургических реакций взаимодействия жидкого металла сильно перегретой капли с истекающим из сопла потоком защитной газовой смеси, а также продуктами ее высокотемпературных преобразований. Исследования проводились нами в два этапа. На первом этапе производился анализ коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание. Результаты представлены на рис. 4, 5 в виде графических зависимостей.

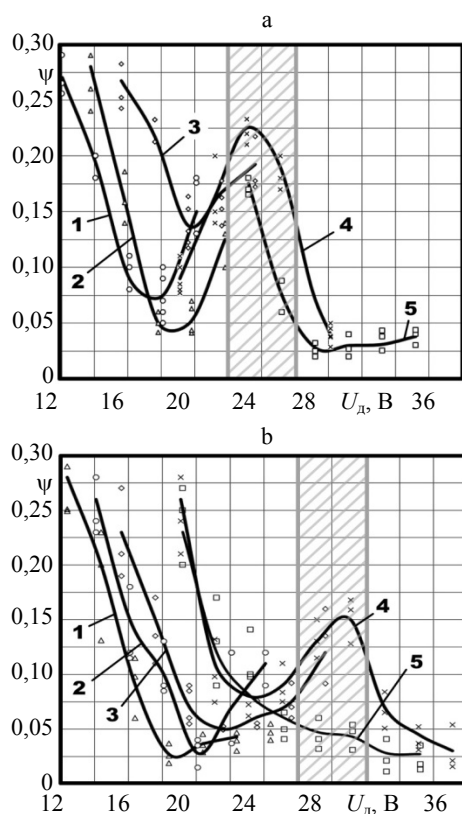


Рис. 4. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ( $\psi$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого SF<sub>6</sub> в защитную атмосферу: 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 м/мин; а – сварка в среде 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>; б – 0,5 % SF<sub>6</sub>

*F Fig. 4.* Dependence of the value of the loss coefficient of the electrode metal ( $\psi$ ) on the arc voltage ( $U_d$ ) at different values of the filler wire feed speed and the amount of SF<sub>6</sub> introduced into the shielding atmosphere: 1 – 2,3 m/min; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 m/min; а – surfacing in 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> mixtures; б – 0,5 % SF<sub>6</sub>

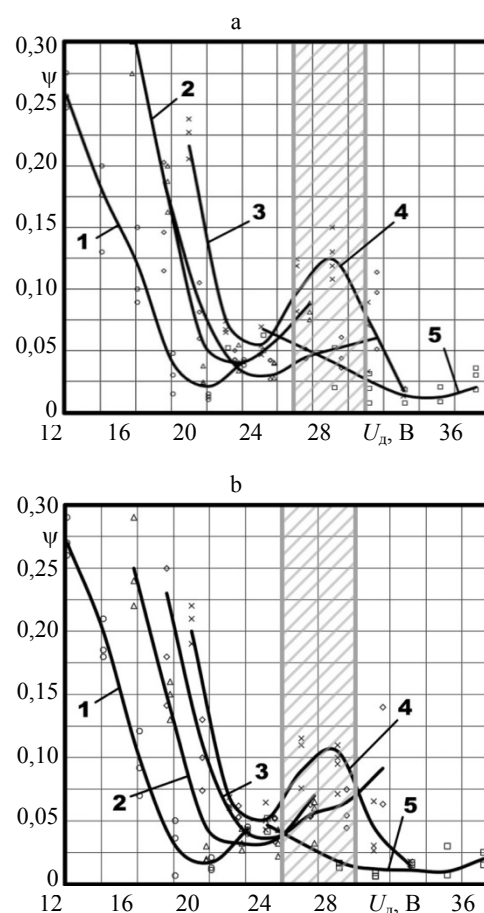


Рис. 5. Зависимость значения коэффициента потерь электродного металла ( $\psi$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях скорости подачи присадочной проволоки и количестве вводимого SF<sub>6</sub> в защитную атмосферу: 1 – 2,3 м/мин; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 м/мин; а – 1,0 % SF<sub>6</sub>; б – 2,0 % SF<sub>6</sub>

*Fig. 5.* Dependence of the value of the loss coefficient of the electrode metal ( $\psi$ ) on the arc voltage ( $U_d$ ) at different values of the filler wire feed speed and the amount of SF<sub>6</sub> introduced into the shielding atmosphere: 1 – 2,3 m/min; 2 – 3,7; 3 – 5,3; 4 – 7,7; 5 – 9,2 m/min; а – 1,0 % SF<sub>6</sub>; б – 2,0 % SF<sub>6</sub>

Анализ полученных в ходе проведения экспериментов результатов показал, что на графиках зависимостей коэффициента потерь электродного металла от напряжения на дуге имеются три характерных участка.

Первый из них характеризуется относительно высокими значениями потерь электродного металла на разбрызгивание, достигающими в некоторых случаях более 25–30 %. Он соответствует значениям напряжения на дуге 17–19 В (в зависимости от скорости подачи присадочной проволоки). Повышенное разбрызгивание

связано с длительными короткими замыканиями дугового промежутка, выбросом части расплавленного металла за пределы зоны горения дуги, крупными выплесками части расплавленной ванны с образованием большого количества «набрызгиваний» на поверхность пластины. Такое соотношение значений параметров режима (силы тока, определяемой скоростью подачи присадочной проволоки и напряжения на дуге) является нежелательным и на практике не рекомендуется к использованию. Валик наплавленного металла имеет неравномерную ширину и неправильную форму поверхности.

Повышение напряжения позволяет стабилизировать процесс благодаря увеличению длины дуги и сокращению длительности коротких замыканий дугового промежутка. При этом удастся получить наиболее стабильный режим и минимизировать потери электродного металла. На графиках можно наблюдать ярко выраженные минимумы. Причем следует отметить, что диапазон значений отклонения напряжения на дуге, определяющий наиболее стабильное состояние процесса, составляет 3–4 В.

Следующий участок характеризуется плавным повышением значений коэффициента потерь при увеличении напряжения на дуге на 4–6 В. При этом фиксируется рост длины дуги с некоторой потерей ее устойчивости. Повышается длительность существования капель расплавленного металла в дуговом промежутке и, как следствие, увеличивается их диаметр, что приводит к росту значения коэффициента потерь при коротком замыкании на поверхность сварочной ванны. В среднем его значение может повыситься в 2 раза. Пространственное сжатие дуги продуктами диссоциации  $\text{SF}_6$  также способствуют изменению условий плавления присадочной проволоки. Возрастает реакционная сила, действующая на каплю со стороны столба дуги и препятствующая ее отрыву, что приводит к росту диаметра капель электродного металла. Это можно зафиксировать в процессе наплавки по характерному звуковому эффекту, отражающему дискретность процесса и его низкую частоту. Рост коэффициента потерь обусловлен спецификой разрыва перемычки жидкого металла между каплей и торцом плавящейся проволоки.

Для большинства используемых при проведении экспериментальных исследований значений параметров режима, соответствующих переносу электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка, наиболее эффективным является момент стабилизации при относительно низких значениях напряжения на дуге, соответствующих второму участку на графиках. Повышение скорости подачи присадочной проволоки до 7,7 м/мин и выше, что соответствует значению силы тока 246–254 А, дестабилизирует процесс. Это вызвано тем, что наличие естественных возмущений в процессе наплавки может вызвать кратковременный переход в область существования струйного характера переноса электродного металла при повышенных напряжениях на дуге. Такой эффект фиксировался нами ранее [7–8] и позволяет получить струйный характер переноса на «докритических» значениях силы тока путем значительного повышения напряжения. Процесс в обычных условиях нестабилен, что приводит к переходу в капельный режим при скачках напряжения. Анализ графических зависимостей коэффициента потерь электродного металла от напряжения соответствует этим представлениям и свидетельствует о двух областях стабилизации: при пониженном напряжении в режиме переноса электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и в режиме нестабильного струйного переноса электродного металла. Вторая область, несмотря на невысокие значения потерь, нами не рассматривается в качестве рекомендуемой в силу чувствительности процесса к возмущениям. Характер зависимостей в этом случае отличается наличием ярко выраженного максимума в среднем диапазоне значений напряжения на дуге.

Графические зависимости, полученные с использованием более высоких значений скорости подачи, характеризуются минимальными значениями коэффициента потерь во всем диапазоне значений напряжения на дуге, что обусловлено струйным характером переноса электродного металла (кривая 5 на рис. 4, 5).

Вторым этапом исследований была оценка частоты коротких замыканий дугового промежутка. Результаты представлены на рис. 6, 7.

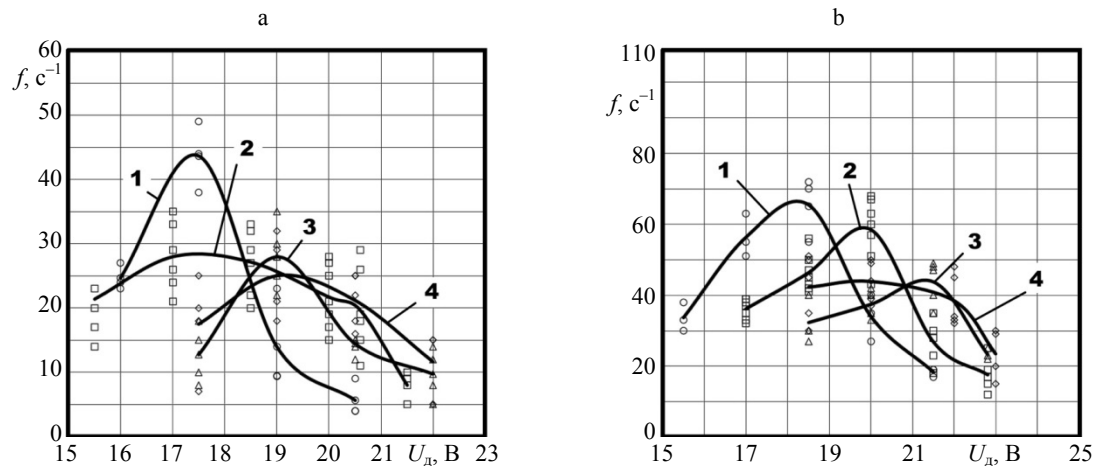


Рис. 6. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка ( $f$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях количества вводимого  $\text{SF}_6$  в защитную атмосферу и скорости подачи присадочной проволоки:  
1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$ ; 2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0,5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ; 4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$ ; а –  $V_{\text{п.пр.}} = 2,3$  м/мин; б – 3,7 м/мин

Fig. 6. Dependence of the frequency of short circuits of the arc gap ( $f$ ) on the voltage on the arc ( $U_d$ ) at different values of the amount of  $\text{SF}_6$  introduced into the shielding atmosphere and the filler wire feed rate:  
1 – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$  mixtures; 2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0,5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ; 4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$ ; а –  $V_{\text{п.пр.}} = 2.3$  m/min; б – 3.7 m/min

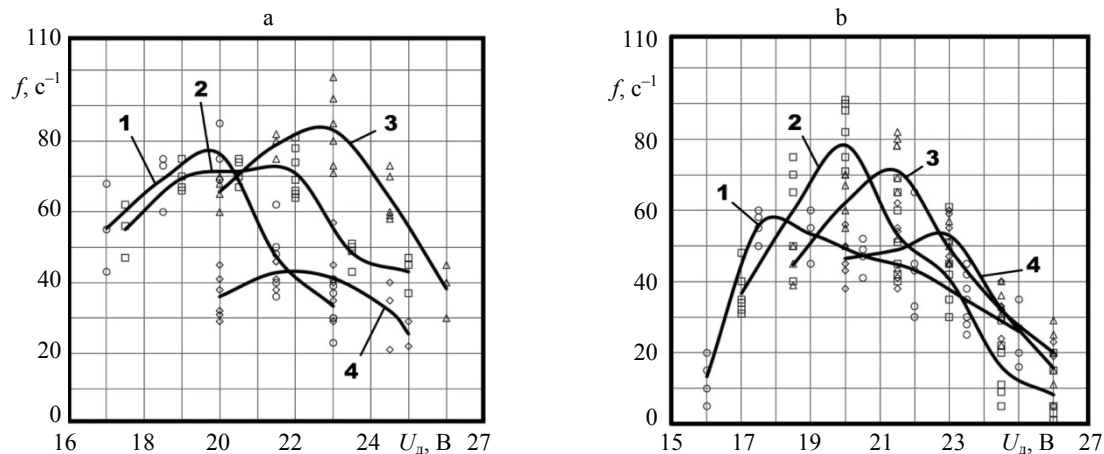


Рис. 7. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка ( $f$ ) от напряжения на дуге ( $U_d$ ) при различных значениях количества вводимого  $\text{SF}_6$  в защитную атмосферу и скорости подачи присадочной проволоки:  
1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$ ; 2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0,5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ; 4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$ ; а –  $V_{\text{п.пр.}} = 5,3$ ; б – 7,7 м/мин

Fig. 7. Dependence of the frequency of short circuits of the arc gap ( $f$ ) on the voltage on the arc ( $U_d$ ) at different values of the amount of  $\text{SF}_6$  introduced into the shielding atmosphere and the filler wire feed rate:  
1 – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$  mixtures; 2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0,5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ; 4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$ ; а –  $V_{\text{п.пр.}} = 5,3$  m/min; б – 7,7 m/min

Результаты экспериментальных исследований показали наличие максимумов на всех графических зависимостях, соответствующих наиболее высоким значениям частоты коротких замыканий дугового промежутка.

Введение  $\text{SF}_6$  снижает частоту коротких замыканий, что объясняется снижением мощно-

сти дугового разряда и, по-видимому, обусловлено высоким потенциалом ионизации фтора. Невысокие значения силы тока при этом приводят к нестабильности процесса. В то же время, как было отмечено ранее, повышение напряжения по сравнению со сваркой в среде Ar +  $\text{CO}_2$  позволяет не только стабилизировать

процесс, но и в некоторых случаях при скоростях подачи присадочной проволоки 5,3 и 7,7 м/мин, что соответствует значению силы тока 195–254 А, повысить частоту. Объяснением этого может быть принципиальное изменение условий существования дугового промежутка. Полученные данные хорошо согласуются с результатами анализа коэффициента потерь, представленными на рис. 4, 5.

Исследования частоты коротких замыканий для режимов, характеризующихся скоростью подачи свыше 7,7 м/мин, не проводились в силу перехода процесса в струйный характер переноса электродного металла.

По совокупности полученных результатов установлены наиболее эффективные соотношения между значениями параметров режима, представленными на рис. 8. Заштрихованная область соответствует нестабильному режиму. В этом случае нами рекомендуется стабилизация процесса в области более низких значений напряжения на дуге (точки а–d на графиках).

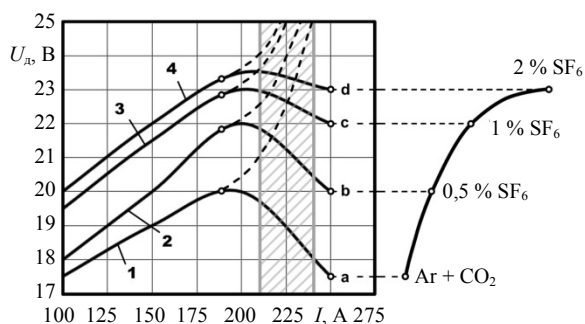


Рис. 8. Графики выбора значений напряжения на дуге в зависимости от значения силы тока и количества вводимого в защитную газовую атмосферу  $\text{SF}_6$  по показателю потерь электродного металла на разбрызгивание:

- 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$ ;  
2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0,5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ;  
4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$

Fig 8. Graphs for selecting arc voltage values depending on the current value and quantity of  $\text{SF}_6$  introduced into the protective gas atmosphere in terms of electrode metal losses due to spattering:

- 1 – surfacing in 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$  mixtures;  
2 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 0.5 %  $\text{SF}_6$ ; 3 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 1 %  $\text{SF}_6$ ;  
4 – (Ar +  $\text{CO}_2$ ) + 2 %  $\text{SF}_6$

## ВЫВОДЫ

1. Наиболее эффективное соотношение между скоростью подачи присадочной проволоки (силой тока) и напряжением на дуге при модификации защитной атмосферы  $\text{SF}_6$  сме-

щено в сторону больших значений напряжения по сравнению с традиционной технологией наплавки в среде Ag +  $\text{CO}_2$ , что объясняется необходимостью увеличения мощности для стабильного существования дугового разряда.

2. Определены области стабильного существования процесса, амплитуда диапазона регулирования значений напряжения в области наиболее эффективных значений не превышает 2–3 В. Причем практически во всех случаях снижение напряжения вызывает более резкую дестабилизацию процесса, чем его повышение. В случае же традиционной технологии с использованием защитной газовой среды 82 % Ar + 18 %  $\text{CO}_2$  наблюдается некоторая симметрия в этом отношении. Это объясняется тем, что введение  $\text{SF}_6$  позволяет при повышении напряжения предотвратить отклонение дуги и ее блуждание из-за чрезмерной длины столба посредством пространственного сжатия.

3. Установлено, что наплавка на повышенных на 2–4 В напряжениях на дуге позволяет несколько повысить частоту коротких замыканий дугового промежутка при введении  $\text{SF}_6$  в количествах 0,5–1 % при силе тока 195–254 А.

## ЛИТЕРАТУРА

- Фетисова, Е. А. Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 20–21 окт. 2022 г. Брест: БрГТУ, 2022. С. 175–178.
- Фетисова, Е. А. Перспективы применения галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // I Республиканский форум молодых ученых учреждений высшего образования: сб. материалов форума. Минск: БНТУ, 2022. С. 75–76.
- Фетисова, Е. А. Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. национальной науч. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г.: в 4 ч. / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. Ч. 2. С. 89–90.
- Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова [и др.] // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. С. 88.
- Коротеев, А. О. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова

- ва // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2022. С. 112–118.
6. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2021. С. 174.
  7. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 1 (74). С. 87–96.
  8. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 2 (79). С. 97–106.
  9. Шукан, Н. М. Влияние модификации защитной атмосферы галогенидом SF<sub>6</sub> на характеристики дугового разряда при сварке / Н. М. Шукан, Е. А. Фетисова, И. И. Цыганков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2023. С. 212.
  10. Фетисова, Е. А. Влияние трехкомпонентной защитной газовой среды на форму и размеры шва при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. А. Коротева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2023. С. 205.
- Поступила 20.03.2024  
Подписана в печать 22.05.2024  
Опубликована онлайн 30.09.2024
- ## REFERENCES
1. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2022) Arc Welding Technology with the Introduction of Modifying Gas Components into a Protective Atmosphere. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva: sb. st. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 20–21 okt. 2022 g.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collected papers from the International Scientific and Technical Conference]. Brest, Brest State Technical University, 175–178 (in Russian).
  2. Fetisova E. A., Koroteev A. O. (2022) Prospects for the Use of Halogen Compounds as Part of a Protective Gas Atmosphere in Arc Welding. *I Respublikanskii forum molodykh uchenykh uchrezhdenii vysshego obrazovaniya: sb. materialov foruma* [1<sup>st</sup> Republican Forum of Young Scientists of Higher Education Institutions: Proceedings of the Forum]. Minsk, Belarusian National Technical University, 75–76 (in Russian).
  3. Fetisova E. A., Koroteev A. O. (2022) Features of Arc Welding and Surfacing with Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: materialy V Vseros. Natsional'noi nauch. konf. molodykh uchenykh, Komsomol'sk-na-Amure, 11–15 apr. 2022 g. Ch. 2* [Youth and Science: current problems of fundamental and applied research: Proceedings of the 5<sup>th</sup> All-Russian National Conference of Young Scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 11–15, 2022. Part. 2]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University, 89–90 (in Russian).
  4. Fetisova E. A., Shukan N. A., Koroteeva A. A., Koroteev A. O. (2022) Installation for Mixing a Three-Component Protective Gas Environment during Welding. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 88 (in Russian).
  5. Koroteev A. O., Fetisova E. A. (2022) Arc Welding with Functional Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Aktual'nye voprosy i peredovye tekhnologii svarki v nauke i promyshlennosti: sb. st. I Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Current Issues and Advanced Technologies in Science and Industry. Collection of articles of the 1st Int. Scientific-Technical Conf.]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 112–118 (in Russian).
  6. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2021) The Influence of Sulphur Hexafluoride in the Composition of the Gas Protective Atmosphere during Arc Welding on the Hydrogen Content in the Deposited Metal. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. Konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 174 (in Russian).
  7. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Koroteeva A. A. (2022) Features of Metallurgical Processes in Arc Welding with Modification of the Protective Gas Atmosphere with Halogen Compounds. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (1), 87–96 (in Russian).
  8. Fetisova E. A., Koroteev A. O., Kulikov V. P., Koroteeva A. A., Lopatina A. A., Dolgaya V. D. (2023) On Losses of Electrode Metal during Arc Welding with Modification of the Protective Atmosphere with Gaseous Halide Compounds. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (2), 79–106 (in Russian).
  9. Shukan N. M., Fetisova E. A., Tsygankov I. I. (2023) The Influence of Modification of the Protective Atmosphere with SF<sub>6</sub> Halide on the Characteristics of the Arc Discharge during Welding. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 212 (in Russian).
  10. Fetisova E. A., Koroteev A. A. (2023) The Influence of a Three-Component Protective Gas Environment on the Shape and Dimensions of a Weld in Arc Welding. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 205 (in Russian).

Received: 20.03.2024

Accepted: 22.05.2024

Published online: 30.09.2024

## Деформационное тепло при растяжении стальных элементов

Докт. техн. наук, доц. Е. А. Мойсейчик<sup>1)</sup>, А. А. Яковлев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Целью работы является приближенная расчетно-экспериментальная оценка удельной энергоемкости и теплообразования на различных стадиях работы материала при растяжении образца. В статье рассмотрен приближенный метод оценки удельной энергоемкости и теплообразования на четырех стадиях деформирования растяжением стального образца. Конечно-элементное моделирование работы изготовленного образца при упруго-пластическом растяжении было выполнено в многофункциональном программном комплексе ANSYS. Нагрузка в цифровой модели образца прикладывалась согласно программе натурных испытаний. В эксперименте использовались плоские образцы по ГОСТ 1497, испытательная машина WAW-1000 с микрокомпьютером 100T, тепловизор testo 875i с температурной чувствительностью 0,05 °C при 30 °C. Сопоставили полученные значения на графиках натурных испытаний и цифровой модели образцов, выявив критические точки и величины отклонений. Поэтапное нагружение выявило, что развитие разрушения происходит на ниспадающих ветвях и сопровождается поэтапным развитием локальной неустойчивости пластического деформирования в форме «шейки». Показано, что температура нагрева растягиваемого металла может быть рассчитана по предлагаемым в статье формулам или расчетом с использованием программного комплекса ANSYS. Результаты испытаний показали, что температуры поверхности образцов на каждой стадии существенно отличаются, выделили четыре основных участка на графике изменения температуры поверхности образца в точке. Выполнен анализ существующей базы измерительных приборов и возможности получения и обработки данных. Экспериментальные величины температур поверхности при непрерывном квазистатическом деформировании превышают их расчетные значения (до 5 раз). Кинетика изменений температурного поля поверхности образца выполнялась термографическими приборами.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, стальные образцы, растяжение, деформационное теплообразование, расчет температуры

**Для цитирования:** Мойсейчик, Е. А. Деформационное тепло при растяжении стальных элементов / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 390–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-390-396>

## Deformation Heat in Tension of Steel Elements

Е. А. Moiseychik<sup>1)</sup>, А. А. Yakovlev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The purpose of the work is an approximate computational and experimental assessment of the specific energy intensity and heat generation at various stages of the material's operation when the sample is stretched. The paper discusses an approximate method for estimating the specific energy intensity and heat generation at four stages of tensile deformation of a steel sample. Finite element modeling of the work of the manufactured sample under elastic-plastic tension was performed in the ANSYS multifunctional software package. The load in the digital model of the sample was applied according to the full-scale test program. The experiment used flat samples in accordance with GOST 1497, a WAW-1000 testing machine with a 100T microcomputer, and a testo 875i thermal imager with a temperature sensitivity of 0.05 °C at 30 °C. We compared the obtained values on graphs of full-scale tests and a digital model of the samples, identifying critical points

### Адрес для переписки

Мойсейчик Евгений Алексеевич  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 146а,  
20114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: + 375 17 374-96-77  
[emoisseitchk@mail.ru](mailto:emoisseitchk@mail.ru)

### Address for correspondence

Moiseychik Evgeny Alekseevich  
Belarusian National Technical University  
146a, Nezavisimosty Ave.,  
220014, Minsk, Republic of Belarus  
Тел.: + 375 17 374-96-77  
[emoisseitchk@mail.ru](mailto:emoisseitchk@mail.ru)

and deviation values. Phased loading revealed that the development of destruction occurs on the descending branches and is accompanied by the gradual development of local instability of plastic deformation in the form of a “neck”. It is shown that the heating temperature of the tensile metal can be calculated using the formulas proposed in the paper or by calculation using the ANSYS software package. The test results showed that the surface temperatures of the samples at each stage differ significantly. Four main areas were identified on the graph of changes in the sample surface temperature at a point. An analysis of the existing database of measuring instruments and the ability to obtain and process data was carried out. Experimental values of surface temperatures during continuous quasi-static deformation exceed their calculated values (up to 5 times). The kinetics of changes in the temperature field of the sample surface was carried out using thermographic instruments.

**Keywords:** stress-strain state, steel samples, stretching, deformation heat generation, temperature calculation

**For citation:** Moiseychik E. A., Yakovlev A. A. (2024) Deformation Heat in Tension of Steel Elements. *Science and Technique*. 23 (5), 390–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-390-396> (in Russian)

## Введение

В диагностике получают распространение различные измерительные технологии с использованием высокоточной инфракрасной термографии (ИК-термографии) [1]. Такая тенденция стала возможной благодаря высокой производительности применяемых инфракрасных приборов и высокоточного измерительного оборудования, а также стремительному развитию технологии обработки сигналов. В результате этого инфракрасная термография становится основной составляющей диагностико-измерительных систем с широкой областью применения. Эти системы не ограничиваются традиционным измерением температуры тел по инфракрасному излучению, а распространяются на неразрушающие технологии контроля напряженного состояния твердых тел, выявление предельных состояний конструктивных элементов и трещиноопасных зон в конструкциях, диагностику трещин и т. д.

ИК-технологии работают на тепле искусственно создаваемых в теле источников (активные методы), или тепловых источников, формирующихся в процессах выполнения рабочих функций изделий (пассивные методы). Так, нагрев обмоток электродвигателя в процессе его работы, нагрев или охлаждение стальных элементов при различных видах деформирования и другие – все это относится к пассивным методам теплообразования. Теплообразование при деформировании конструкционных материалов используется в дистанционных технологиях контроля дефектов и прогнозирования работоспособности различных стальных изделий на основе тепловой пассивной инфракрасной термографии [2, 3]. При этом в режиме мониторинга фиксируется

кинетика температурного поля поверхности изделия, конструкции термографическими приборами [10]. При развитии упруго-пластических деформаций в окрестности структурных составляющих материала, конструктивных, технологических или эксплуатационных дефектов, зарождении и развитии трещины в изделии такие зоны становятся источниками теплообразования, вследствие чего изменяется и локальная (у дефекта) температура поверхности изделия. Природа такого деформационного теплообразования рассмотрена в [2].

Из молекулярно-кинетической теории газов известно, что температура газа уменьшается, когда происходит адиабатическое расширение, и, наоборот, его температура увеличивается при адиабатическом сжатии. В твердых телах подобное явление возникает в результате приложения напряжений к материалу исследуемой зоны твердого тела. Это является следствием эффекта термоупругости. В металлических сплавах и других квазиоднородных материалах генерация тепла за счет эффекта термоупругости может быть смоделирована уравнением [4]

$$\Delta T = -\frac{T_\alpha}{c_p \rho} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура исследуемой точки;  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения материала;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном напряжении;  $\rho$  – плотность материала;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Для расчета  $\Delta T$  по формуле (1) необходимо получить компоненты тензора напряженного состояния в каждой из исследуемых точек изделия. Такой способ контроля напряженного состояния имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: дистанционные (бес-

контактные) измерения, отсутствие тщательной подготовки поверхности изделия, высокая производительность измерений, низкая стоимость работ и др.

Метод находит применение при диагностике конструкций и узлов ответственных сооружений и машин [1–6]. Так, в работах [5, 6] в эксперименте подтверждается, «что методом экспериментальной термографии по эффекту саморазогрева металла можно достаточно точно и уверенно выявлять вершины усталостных трещин в конструкциях металлических мостов».

Целью настоящей статьи является приближенная расчетно-экспериментальная оценка удельной энергоемкости и теплообразования на различных стадиях работы материала при растяжении образца.

### Приближенный расчет теплообразования при одноосном деформировании [7]

При деформировании растяжением стальных элементов (образцов) можно наблюдать четыре стадии их работы (рис. 1). Первая стадия характеризуется упругой работой материала. На второй стадии появляется площадка текучести и затрачивается соответствующая механическая работа. На третьей стадии деформирование растянутого элемента происходит равномерно в пределах рабочей зоны 1 (рис. 1). На третьей стадии в равномерно деформируемом металле образуется «шейка», зарождение и развитие которой происходит в произвольном сечении рабочей длины  $l$  образца. В процессе деформирования в единице объема материала образца накапливается механическая энергия (удельная энергоемкость), которая почти полностью превращается в тепло. Полученное в результате деформации тепло (деформационное тепло) рассеивается в металле образца и окружающей среде. При этом нагрев металла элемента деформационным теплом происходит неодинаково: больше нагреваются участки металла, примыкающие к дефектам. Обобщенная диаграмма деформирования  $\sigma$ – $\varepsilon$  и теплообразования  $t$ – $\varepsilon$  представлена на рис. 1.

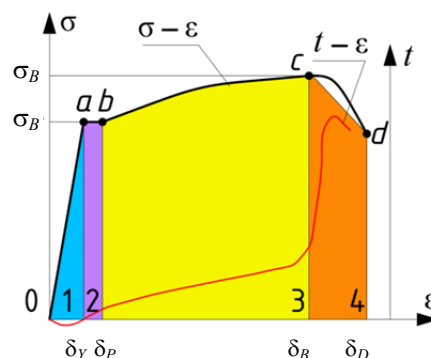


Рис. 1. Обобщенная диаграмма деформирования  $\sigma$ – $\varepsilon$  и теплообразования  $t$ – $\varepsilon$

Fig. 1. Generalized diagram of deformation  $\sigma$ – $\varepsilon$  and heat generation  $t$ – $\varepsilon$

Удельная энергоемкость  $a_v$  при упругой работе элемента составляет:

на первой стадии

$$a_{v1} = \frac{\sigma_T}{2} \delta_Y; \quad (2)$$

на второй стадии

$$a_{v2} = \sigma_T (\delta_P - \delta_Y); \quad (3)$$

на третьей стадии

$$a_{v3} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2} (\delta_B - \delta_P). \quad (4)$$

Обозначая разрушающие напряжения на четвертой стадии деформирования через  $\sigma_D$ , аналогично получаем

$$a_{v4} = \frac{\sigma_B + \sigma_D}{2} (\delta_D - \delta_P). \quad (5)$$

Выполнив обработку данных, определим среднюю температуру стали образцов на каждой из приведенных стадий. Принимаем, что теплообразование происходит за малый промежуток времени, в течение которого стальной элемент (образец) не обменивается теплотой с окружающим пространством (адиабатический процесс). Для таких условий изменение температуры на каждом участке диаграммы (рис. 1) можно приближенно определить по формуле

$$\Delta t = \frac{\beta a_v}{c\rho}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент Тейлора–Квинни, являющийся постоянной величиной, лежащей в пределах от 0 до 1;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала.

Коэффициент Тейлора–Квинни имеет сложную природу [8, 9]. При расчетах по формуле (5) можно принимать коэффициент Тейлора–Квинни  $\beta = 0,9$ .

### Образцы, методика их испытания и обработка результатов

Для экспериментальных испытаний на растяжение изготавливались плоские образцы по ГОСТ 1497 (рис. 2) двух типов. Первый образец имел толщину 20 мм, рабочую длину  $l_0 = 140$  мм; материал – сталь 09Г2С. Второй образец: толщина 7,9 мм, рабочая длина  $l_0 = 140$  мм, сталь – ВСт3сп. Образцы подвергались растяжению на электронно-гидравлической серво-приводной универсальной испытательной машине WAW-1000 с микрокомпьютером 100Т. Скорость нагружения  $v$  находилась в пределах  $3 \leq v \leq 9$  Н/(мм<sup>2</sup>·с). При испытании второй образец нагружался с перерывами по 5–7 с для контроля процесса трещинообразования в поверхностной окалине и развития полос Людерса–Чернова в металле.

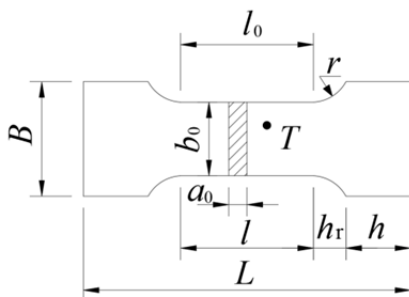


Рис. 2. Схема экспериментального образца

Fig. 2. Scheme of experimental sample

Первый образец нагружался без перерывов (непрерывно). Данные машинной диаграммы представлялись в численной форме. Пересчет в координатную систему  $\sigma$ – $\varepsilon$  выполнялся в Excel. При растяжении образцы изменяли свое тепловое состояние. Это фиксировалось по изменению величин температуры в точке  $T$

в средней части образца (рис. 2). Температура поверхности измерялась тепловизором testo 875i с температурной чувствительностью прибора меньше 0,05 °С при 30 °С.

Конечно-элементный расчет образцов при упруго-пластическом деформировании производился с использованием программного комплекса ANSYS. Прикладываемая к торцам образцов растягивающая сила  $P_{кр}$  определялась как произведение площади опасного сечения на предел текучести материала. Развитие пластических деформаций в образцах наблюдалось при последовательном приложении к торцам образцов растягивающих сил, характеризуемых членами ряда:  $0,5P_{кр}$ ,  $0,8P_{кр}$ ,  $P_{кр}$ ,  $1,05P_{кр}$ ,  $1,2P_{кр}$ . Материал принимался с билинейным изотропным упрочнением. Тепловыделение при пластическом деформировании представлялось нелинейным процессом. При формировании расчетной модели с целью обеспечения лучшей сходимости расчетных циклов избегали конечных элементов сложной геометрической формы. При разбивке этапов расчета на подэтапы использовали специальную опцию Large Deflection. Доля накопленной энергии пластической деформации, затрачиваемой на теплообразование в образцах, определялась с использованием конечного элемента SOLID226. Определение поверхностной температуры при пластической деформации велось с использованием основных характеристик материала: коэффициента Тейлора–Квинни, удельной теплоемкости, теплопроводности.

### Данные эксперимента и объемной конечно-элементной модели

Графики результатов натурных испытаний образцов приведены на рис. 3. Образец 2 был доведен до полного разрушения, первый образец – до образования шейки (рис. 4).

На образце 2 (рис. 4) выявлены следы полос скольжения, которые образовались в нем при приложении нагрузки на интервале  $a$ – $c$ . Разрушение обоих образцов развивалось на ниспадающих ветвях, что видно на полученных графиках, и сопровождалось поэтапным развитием локальной неустойчивости пластического деформирования в форме «шейки».

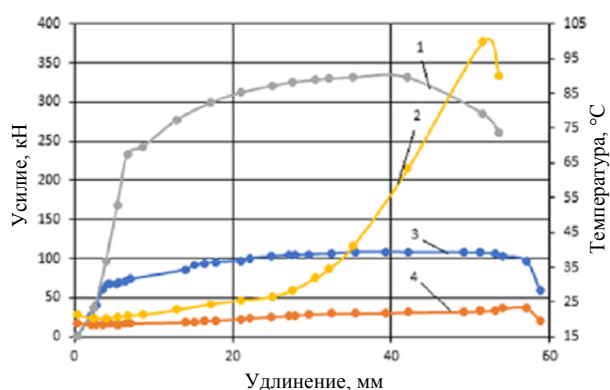


Рис. 3. Изменения температуры поверхности в точке  $T$  испытываемых образцов при растяжении, полученные в результате испытаний:  
1, 3 – графики «усилие–удлинение» для образцов 1 и 2;  
2, 4 – температуры поверхности в опасном сечении образцов 2 и 1

Fig. 3. Change in surface temperature at point  $T$  of tested samples during tension obtained as a result of tests:  
1, 3 – “force–elongation” graphs for samples 1 and 2;  
2, 4 – surface temperatures in dangerous section of samples 2 and 1



Рис. 4. Общий вид образцов 1 и 2 после испытания:  
а – излом образца 1; б – шейка в образце 2

Fig. 4. General view of samples after testing:  
а – fracture of the sample 1; б – neck in the sample 2

Фактически полученные графики экспериментальных кривых 1 и 3 (рис. 3) отображают основные четыре участка. Резкое нарастание теплообразования происходит на стадии зарождения и развития «шейки» в элементе. Температура поверхности первого образца (рис. 3, кривая 4) на этой стадии деформирования достигала  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Данные расчета напряженно-деформированного и энергетического состояния экспериментальных образцов приведены на рис. 5–7. В процессе расчетного анализа подмечено, что фронт эквивалентных напряжений и пластиче-

ских деформаций при росте растягивающей силы от  $0,8P_{кр}$  до  $1,05P_{кр}$  для принятой модели образцов распространялся от середины образца к месту защемления захватов.

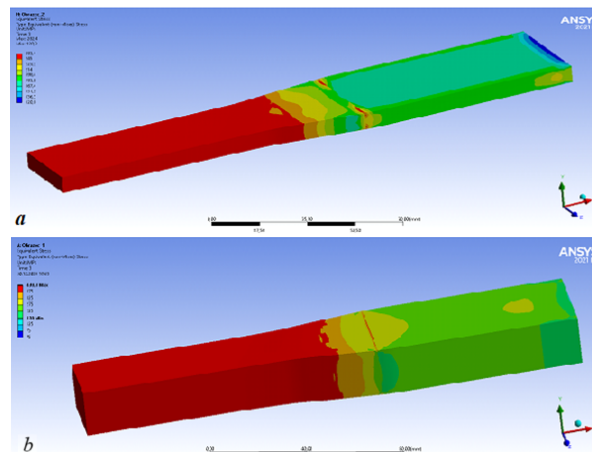


Рис. 5. Эквивалентные напряжения, по Мизесу, в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной  $1,05P_{кр}$  (красный цвет – напряжения, превышающие  $\sigma_T$ )

Fig. 5. Equivalent von Mises stresses in sample 1 and sample 2 under loading with a force equal to  $1.05R_{cr}$  (red color – stresses exceeding  $\sigma_T$ )

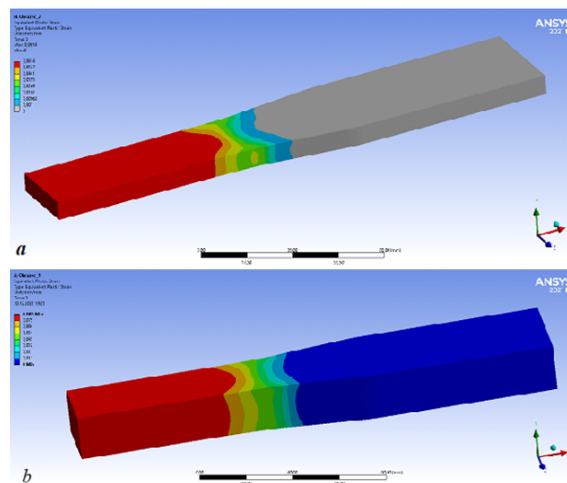


Рис. 6. Эквивалентные пластические деформации в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной  $1,05P_{кр}$

Fig. 6. Equivalent plastic deformations in sample 1 and sample 2 under loading with a force equal to  $1.05R_{cr}$

Наибольшее расчетное значение температуры поверхности образцов составляло:  $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для образца 1) и  $24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для образца 2). Начальная температура образцов составляла  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

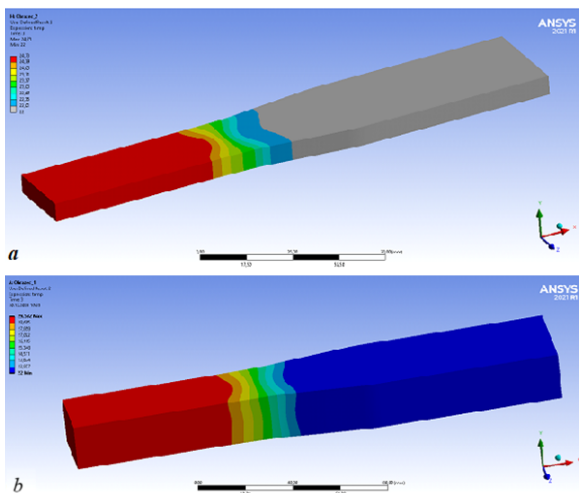


Рис. 7. Поверхностная температура в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной  $1,05P_{кр}$

Fig. 7. Surface temperature in sample 1 and sample 2 when loaded with a force equal to  $1.05R_{cr}$

Обсуждение результатов

Данные рис. 3 показывают, что наибольший рост температуры образцов развивался при образовании и развитии шейки. Например, резкий скачок от 30 до 100 °С на температурной кривой 4 (рис. 3) образовался за 1/10 всего времени нагружения.

Расчетные величины изменения температур  $\Delta t$ , полученные по формулам (1)–(5) для стадий 1–4 деформирования образцов, приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Изменения температур  $\Delta t$  для стадий деформирования 1–4, полученные расчетом  
Temperature changes  $\Delta t$  for deformation stages 1–4, obtained by calculation

| Стадия деформирования образцов и $\Delta t$ (рис. 1) | Нагрев материала образцов $\Delta t, ^\circ\text{C}$ , при их деформировании на стадиях |      |      |      |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                      | 1-я                                                                                     | 2-я  | 3-я  | 4-я  |
| Образец 1                                            | 1,04                                                                                    | 0,92 | 25,5 | 10,2 |
| Образец 2                                            | 2,34                                                                                    | 1,32 | 24,5 | 6,75 |

Из сравнения данных таблицы с экспериментальными (рис. 3) вытекает, что температуры поверхности образцов 1 и 2 на каждой стадии существенно отличаются. Меньшие величины температур для образца 1, полученные при прямых измерениях, объясняются остыва-

нием металла в промежутках между ступенями его деформирования. Таких перерывов для образца 2 не происходило. Растяжение образца 2 велось непрерывно, вплоть до зарождения трещины скола в шейке. Фактически полученные значения температуры поверхности образца 2 на стадии 3 деформирования в 4 раза превышали расчетное. Такое расхождение объясняется как погрешностями расчета по формулам (1)–(5), так и пренебрежением долей теплообразования из-за твердотельных реакций в деформируемом металле [10].

ВЫВОДЫ

1. Температура нагрева металла деформируемого растяжением элемента в первом приближении может быть рассчитана по формулам (1)–(6). Более точные данные можно получить при автоматизированном расчете с использованием конечно-элементного анализа и соответствующих программных комплексов.
2. Экспериментальные величины температур поверхности при непрерывном квазистатическом деформировании существенно (до 5 раз) превышают их расчетные значения, что объясняется появлением значительных пластических деформаций.
3. Фиксирование температурных полей металлических элементов при их деформировании следует выполнять с использованием измерительных инфракрасных приборов дистанционно, с записью результатов в форме термофильмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nishina Yoshiaki. Various Measurement Technologies (Temperature/Stress/Fatigue/Crack) with Highly Precise Infrared Thermography and Their Applications / Nishina Yoshiaki, Imanishi Daisuke, Shibuya Kiyoshi // JFE Technical Report. 2012. No 17. P. 10–16.

2. Мойсейчик, Е. А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин / Е. А. Мойсейчик. Минск: Ковчег, 2022. 200 с.

3. Фам, Д. К. Кинетика накопления повреждений и критерий предельного состояния конструкционных материалов / Д. К. Фам, А. Н. Бабак, В. В. Коваль // Mechanics and Advanced Technologies. № 1 (82). 2018. С. 131–138. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127123>.

4. Мойсейчик, А. Е. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования / А. Е. Мойсейчик, Е. А. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. 2014. № 3. С. 3–19.
5. Глушков, С. П. Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии / С. П. Глушков, Л. Ю. Соловьев, А. Л. Соловьев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (45). С. 63–71.
6. Sakagami, T. Application of Infrared Thermography to Structural Integrity Evaluation of Steel Bridges / T. Sakagami, Y. Izumi, S. Kubo // Journal of Modern Optics. 2010. Vol. 57, No 18. P. 1738–1746. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289>.
7. Яковлев, А. А. Удельная энергоемкость и теплообразование в стальных образцах при квазистатическом растяжении / А. А. Яковлев, Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик // Теоретическая и прикладная механика: международ. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2023. Вып. 38. С. 112–117.
8. Rosakis, P. A. A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals / P. A. Rosakis, A. I. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2000. Vol. 48, No 3. P. 581–607. [https://doi.org/10.1016/s0022-5096\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/s0022-5096(99)00048-4).
9. Zaera, R. On the Taylor–Quinney Coefficient in Dynamically Phase Transforming Materials. Application 304 stainless steel / R. Zaera, J. A. Rodriguez-Martinez, D. Rittel // International Journal of Plasticity. 2012. Vol. 40. P. 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>.
10. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д. Ю. Головин [и др.]; под общ. ред. Ю. И. Головина. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 214 с.
2. Moiseichik E. A. (2022) *Thermal Control of Materials, Steel Structures and Machines*. Minsk, Kovcheg Publ. 200 (in Russian).
3. Pham D. K., Babak A. N., Koval V. V. (2018) Kinetics of Damage Accumulation and Limit State Criterion for Structural Materials. *Mechanics and Advanced Technologies*, (1), 131–138 (in Russian). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127123>.
4. Moiseichik A. E., Moiseichik E. A. (2014) Fundamentals of Thermal Control of Load-Bearing Structures Using Deformation Heat Generation. *Nerazrushayushchiy Kontrol i Diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], (3), 3–19 (in Russian).
5. Glushkov S. P., Soloviev L. Yu., Soloviev A. L. (2018) Experimental Assessment of the Durability of Welded Metal Bridge Spans Using the Infrared Thermography Method. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* [Siberian Transport University Bulletin], (2), 63–71 (in Russian).
6. Sakagami T., Izumi Y., Kubo S. (210) Application of Infrared Thermography to Structural Integrity Evaluation of Steel Bridges. *Journal of Modern Optics*, 57 (18), 1738–1746. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289>.
7. Yakovlev A. A., Moiseichik E. A., Moiseichik A. E. (2023) Specific Energy Intensity and Heat Generation in Steel Samples under Quasi-Static Tension. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.* [Theoretical and Applied Mechanics. International Scientific and Technical Collection]. Minsk, BNTU, Iss. 38, 112–117 (in Russian).
8. Rosakis P. A., Rosakis A. I., Ravichandran G., Hodowany J. (2000) A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (3), 581–607. [https://doi.org/10.1016/s0022-5096\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/s0022-5096(99)00048-4).
9. Zaera R., Rodriguez-Martinez A., Rittel D. (2012) On the Taylor–Quinney Coefficient in Dynamically Phase Transforming Materials. Application 304 stainless steel. *International Journal of Plasticity*, 40, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>.
10. Golovin D. Yu., Tyurin A. I., Samodurov A. A., Divin A. G., Golovin Yu. I. (2019) *Dynamic Thermographic Methods of Non-Destructive Express Testing*. Moscow, TEKH-NOSFERA Publ. 214 (in Russian).

Поступила 18.06.2024

Подписана в печать 20.08.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

## REFERENCES

Received: 18.06.2024

Accepted: 20.08.2024

Published online: 30.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-397-403>

УДК 539.384

## Исследование деформаций статически неопределимой балки в промышленных и судостроительных конструкциях

С. В. Гончарова<sup>1)</sup>, магистр техн. наук В. М. Хвасько<sup>1)</sup>, студенты Е. А. Гончарова<sup>1)</sup>, Н. А. Махнач<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье рассматривается анализ деформаций в статически неопределимой балке на примере киль судна – двутавровой балки, играющей важную роль в обеспечении устойчивости и конструкции судна. Исследование осуществляется с помощью сочетания теоретического и экспериментального подходов. Метод сил выбран для теоретического анализа как универсальный инструмент для статически неопределимых балок, позволяющий оценить деформации и напряжения в различных точках балки. Он включает в себя подбор оптимального сечения, что является преимуществом данного подхода. Метод конечных элементов, реализованный с помощью ПК Ansys 2021 R2, используется для экспериментального анализа и визуализации деформации изгиба. Он обеспечивает более гибкий и мощный инструмент для анализа сложных конструкций, учитывая разнообразные граничные условия. Результаты исследования были сопоставлены, погрешности вычислений оказались минимальными и допустимыми. В статье подчеркивается важность проведения подобных анализов для понимания поведения конструкций под нагрузками и обеспечения их надежности не только в транспортном, но и в промышленном и гражданском строительстве.

**Ключевые слова:** киль, статически неопределимая балка, поперечный изгиб, деформация, изгибающий момент, условие прочности, двутавр, метод сил, метод конечных элементов

**Для цитирования:** Исследование деформаций статически неопределимой балки в промышленных и судостроительных конструкциях / С. В. Гончарова [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 397–403. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-397-403>

## Study of Deformations in Statically Indeterminate Beam in Industrial and Shipbuilding Structures

S. V. Goncharova<sup>1)</sup>, V. M. Khvasko<sup>1)</sup>, E. A. Goncharova<sup>1)</sup>, N. A. Makhnach<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper considers the analysis of deformations in a statically indeterminate beam using the example of a ship's keel – an I-beam that plays an important role in ensuring the stability and structure of the vessel. The research is carried out through a combination of theoretical and experimental approaches. The force method was chosen for theoretical analysis as a universal tool for statically indeterminate beams, allowing to estimate deformations and stresses at various points of the beam. It includes the selection of the optimal cross section, which is an advantage of this approach. The finite element method (FEM), implemented using Ansys 2021 R2 PC, is used for experimental analysis and visualization of bending deformation.

### Адрес для переписки

Хвасько Виктория Михайловна  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел. +375 17 293-92-36  
[hvasko.victoriya@gmail.com](mailto:hvasko.victoriya@gmail.com)

### Address for correspondence

Khvasko Victoriya M.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: 375 17 293-92-36  
[hvasko.victoriya@gmail.com](mailto:hvasko.victoriya@gmail.com)

This method provides a more flexible and powerful tool for analyzing complex structures, taking into account a variety of boundary conditions. The results of the study were compared, and the calculation errors turned out to be minimal and acceptable. The paper emphasizes the importance of conducting such analyses to understand the behavior of structures under loads and ensure their reliability not only in transport, but also in industrial and civil construction.

**Keywords:** keel, statically indeterminate beam, lateral bending, deformation, bending moment, strength criterion, I-beam, method of forces, finite element method

**For citation:** Goncharova S. V., Khvasko V. M., Goncharova E. A., Makhnach N. A. (2024) Study of Deformations in Statically Indeterminate Beam in Industrial and Shipbuilding Structures. *Science and Technique*. 23 (5), 397–403. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-397-403> (in Russian)

## Введение

Основной сферой применения двутавровых балок является создание различных металлических каркасных конструкций для промышленного, транспортного и гражданского строительства. Они нашли широкое применение при возведении колонн, строительстве мостов и высотных зданий, укреплении шахтных стволов, а также в качестве конструктивных элементов набора корпуса транспортных средств. Например, в судостроении главной балкой в корпусе судна является килевая балка (киль), имеющая форму двутавра (рис. 1).

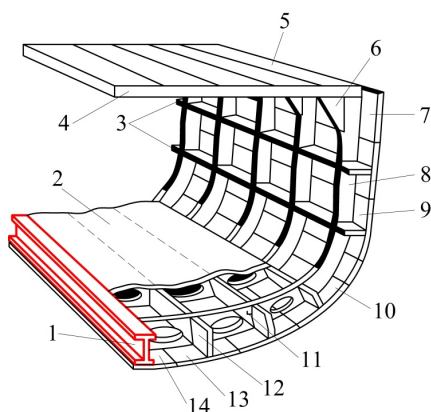


Рис. 1. Смешанный набор корпуса судна:

- 1 – киль; 2 – настил второго дна; 3 – бортовые стрингеры; 4 – бимс; 5 – палубный стрингер; 6 – кница; 7 – ширстрек; 8 – шпангоут; 9 – бортовой пояс; 10 – скуловой пояс; 11 – флор; 12 – днищевой стрингер; 13 – шпунтовой пояс; 14 – килевой пояс

Fig. 1. Mixed ship hull set: 1 – keel; 2 – flooring of the second bottom; 3 – side stringers; 4 – beam; 5 – deck stringer; 6 – knits; 7 – shearstrek; 8 – frame; 9 – side belt; 10 – zygomatic girdle; 11 – floor; 12 – bottom stringer; 13 – tongue and groove belt; 14 – keel belt

Киль – это конструктивный элемент, расположенный на днище судна. Он представляет собой продольную балку, проходящую от носа (передней части) до кормы (задней части) и служащую основой судна [1–2]. Назначение килля – обеспечивать устойчивость и прочность судна, предотвращать чрезмерное боковое смещение для безопасного и эффективного плавания.

Киль является статически неопределимой балкой, что придает особую сложность анализу его деформаций в области исследования прочности конструкции. Расчет деформаций в статически неопределимых балках остается одним из наиболее сложных вопросов инженерной механики.

В настоящей работе ставится целью вычисление деформаций в статически неопределимой балке путем теоретических (метод сил) и экспериментальных (метод конечных элементов) исследований, сопоставление и анализ полученных результатов.

## Метод сил

В качестве исследуемой рассмотрим статически неопределимую балку с жесткой заделкой, схема нагружения которой приведена на рис. 2.

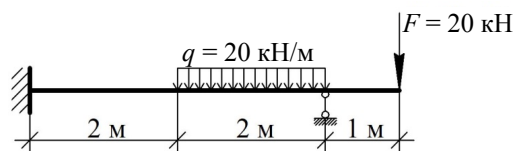


Рис. 2. Схема нагружения балки  
Fig. 2. Beam loading scheme

Ранее в работе [3] данная балка рассчитана с помощью метода начальных параметров, там же приведены особенности данного способа применительно к предложенной конструкции балки.

В данной работе предлагается метод сил в качестве инструмента для вычисления деформаций статически неопределимой балки с выполнением следующих этапов расчета [4–6]:

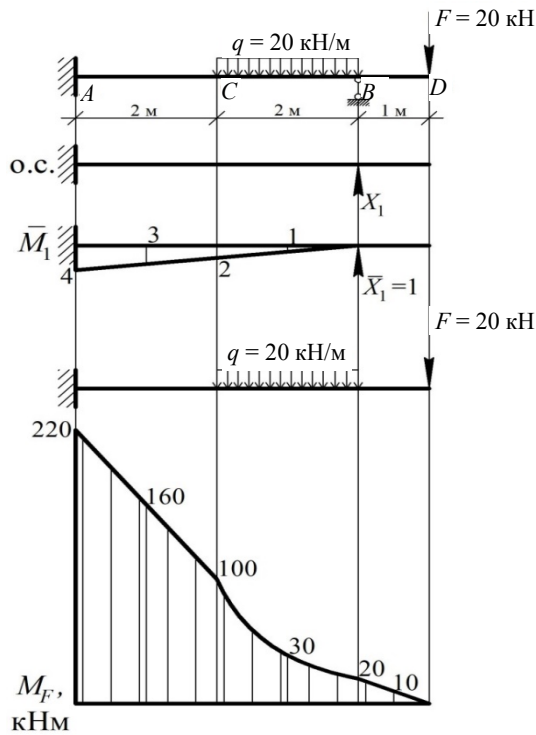
1. Выбираем основную систему (о.с.) (рис. 3).

2. Строим единичную эпюру ( $\bar{M}_1$ ) и грузовую эпюру ( $M_F$ ) изгибающих моментов в основной системе (рис. 3).

3. Записываем каноническое уравнение метода сил

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1F} = 0, \quad (1)$$

где  $X_1$  – неизвестная реакция опоры B.

Рис. 3. Эпюры  $\bar{M}_1$  и  $M_F$ Fig. 3. Diagrams of  $\bar{M}_1$  and  $M_F$ 

4. Вычисляем коэффициенты уравнения (1) по методу Симпсона [4]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} &= \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1}{EI_x} dz = \\ &= \frac{4}{6EI_x} (0 \cdot 0 + 4 \cdot 2 \cdot 2 + 4 \cdot 4) = \frac{64}{3EI_x}; \\ \Delta_{1F} &= \sum \int \frac{M_F \cdot \bar{M}_1}{EI_x} dz = \\ &= \frac{2}{6EI_x} (0 \cdot 20 - 4 \cdot 30 \cdot 1 - 2 \cdot 100) + \\ &+ \frac{2}{6EI_x} (-100 \cdot 2 - 4 \cdot 160 \cdot 3 - 4 \cdot 220) = -\frac{3400}{3EI_x}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Находим силу  $X_1$ , подставив коэффициенты (2) в уравнение (1):

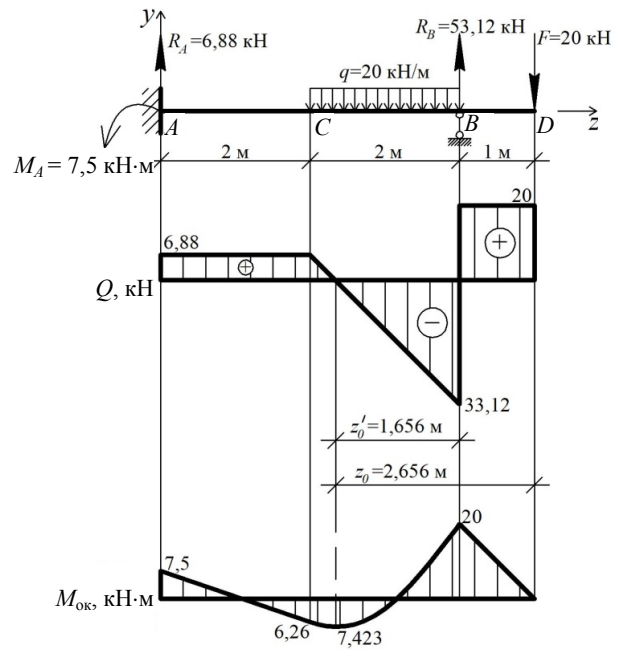
$$X_1 = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}} = \frac{3400 \cdot 3}{3 \cdot 64} = 53,12 \text{ (кН)}. \quad (3)$$

Значит,  $R_B = 53,12$  кН, следовательно, статическая неопределенность раскрыта.

5. Вычисляем реакции в заделке A из уравнений равновесия статики:

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0; -M_A + q \cdot 2 \cdot 3 - R_B \cdot 4 + F \cdot 5 = 0; \\ M_A &= 20 \cdot 6 - 53,12 \cdot 4 + 20 \cdot 5 = 7,5 \text{ кНм}; \\ \sum F_y &= 0; R_A - q \cdot 2 + R_B - F = 0; \\ R_A &= 20 \cdot 2 - 53,12 + 20 = 6,88 \text{ кН}. \end{aligned} \quad (4)$$

6. Строим окончательные эпюры поперечных сил  $Q$  и изгибающих моментов  $M$  (рис. 4).

Рис. 4. Эпюры  $Q$  и  $M$ Fig. 4. Diagrams of  $Q$  and  $M$ 

7. Для построения упругой линии определим прогибы в опасных сечениях балки C, D. Построим единичные эпюры моментов в основной системе (рис. 5).

Тогда

$$\begin{aligned} y_C &= \sum \int \frac{M_{ок} \cdot \bar{M}_C}{EI_x} dz = \\ &= \frac{2}{6EI_x} (0 \cdot 6,26 + 4 \cdot 1 \cdot 0,62 + 7,5 \cdot 2) = \frac{5,826}{EI_x}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y_D &= \sum \int \frac{M_{ок} \cdot \bar{M}_D}{EI_x} dz = \\ &= \frac{1}{6EI_x} (0 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 1 \cdot 20) + \frac{2}{6EI_x} \times \\ &\times (20 \cdot 1 - 4 \cdot 3,12 \cdot 2 - 6,26 \cdot 3) + \\ &+ \frac{2}{6EI_x} (-6,26 \cdot 3 + 4 \cdot 0,62 \cdot 4 + 5 \cdot 7,5) = \frac{8,273}{EI_x}. \end{aligned} \quad (6)$$

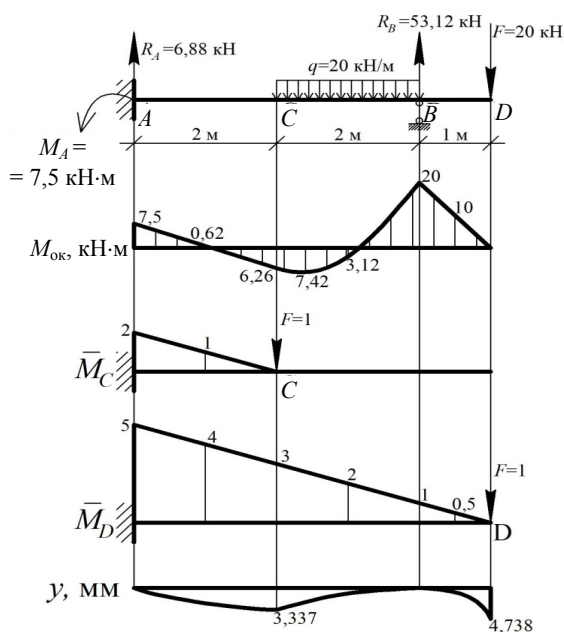


Рис. 5. Эпюры  $\bar{M}$  и  $\bar{M}_D$ , упругая линия балки

Fig. 5. Diagrams of  $\bar{M}$  and  $\bar{M}_D$ , elastic line of the beam

**Примечание.** Эпюры изгибающих моментов  $M$  строим со стороны растянутых волокон.

8. Из условия прочности подберем сечение двутавра, приняв  $R = 210$  МПа (материал – сталь);  $M_{\max} = 20$  кН·м (из эпюры  $M$  на рис. 4):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq R; \quad (7)$$

$$W_x \geq \frac{M_{\max}}{R}; \quad (8)$$

$$W_x \geq \frac{20 \cdot 10^6}{210} = 95238 \text{ мм}^3 = 95,238 \text{ см}^3.$$

Из таблиц сортамента подбираем двутавр № 16 [7]:

$$W_x = 109 \text{ см}^3; I_x = 873 \text{ см}^4; E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

9. Для выбранного, согласно формулам (7) и (8), двутавра № 16 получим величины прогибов в опасных сечениях:

$$y = \frac{5,826 \cdot 10}{2 \cdot 10 \cdot 873 \cdot 10} = 3,337 \text{ мм};$$

$$y = \frac{8,273 \cdot 10}{2 \cdot 10 \cdot 873 \cdot 10} = 4,738 \text{ мм}.$$

Построим упругую линию балки (рис. 5).

### Метод конечных элементов

Применим метод конечных элементов (МКЭ) для расчета для балки с жесткой заделкой (рис. 2), реализовав его с помощью ПК Ansys 2021 R2 [8–10].

Создаем чертеж поперечного сечения балки в виде двутавра № 16, задавая все необходимые размеры и механические характеристики материала балки (Structural Steel). Выдавливаем форму, устанавливаем длину балки и генерируем объемную модель (рис. 6).

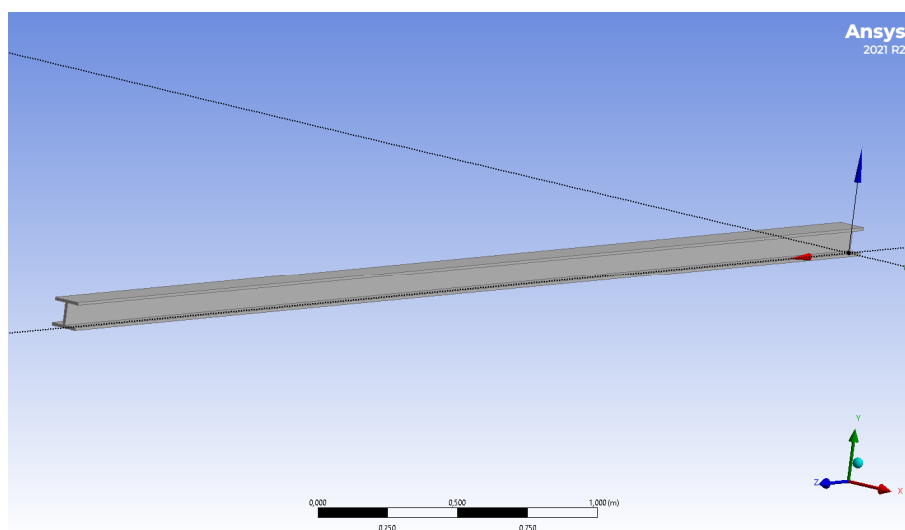


Рис. 6. Объемная модель балки

Fig. 6. Volumetric beam model

Делим балку на участки (Split), накладываем на нее связи в виде жесткой заделки в точке  $A$  (Fixed Support) и подвижной опоры в точке  $B$  (Displacement) и прикладываем заданную нагрузку согласно схеме, приведенной на рис. 2 (Static Structural): распределенную нагрузку на выделенном участке с точкой  $C$  (Force: 20000 N) и сосредоточенную силу в точке  $D$  (Force 2: -20000 N) (рис. 7).

Разбиваем балку на конечные элементы прямоугольной формы и создаем конечно-элементную сетку (рис. 8).

Генерируем решение по определению деформаций балки и получаем визуальный результат изгиба балки под заданной нагрузкой (рис. 9).

Сопоставляем значения прогибов с полученными ранее теоретическими величинами:  $y_C = 0,003388 \text{ м} = 3,388 \text{ мм}$ , отклонение составляет 1,5 %;  $y_D = 0,004656 \text{ м} = 4,656 \text{ мм}$ , отклонение составляет 1,2 %, что считаем допустимым.

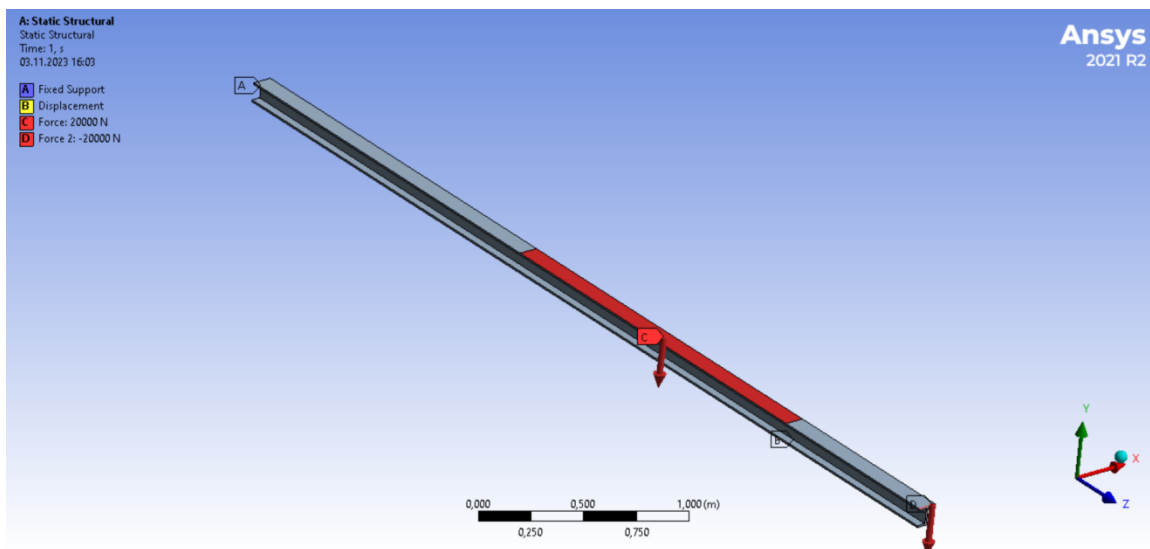


Рис. 7. Задание нагрузки в балке

Fig. 7. Specifying a load in a beam

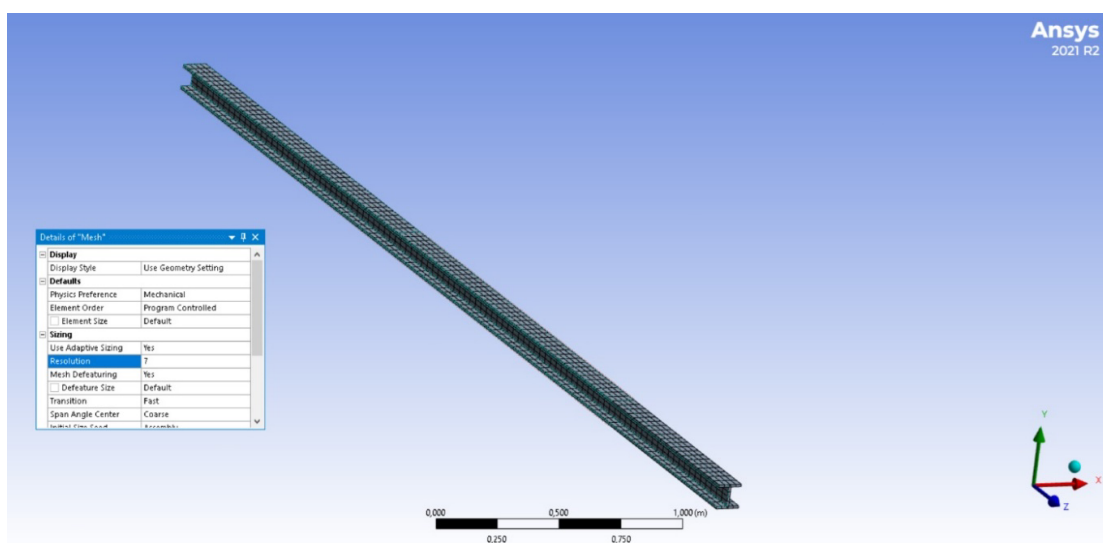


Рис. 8. Конечно-элементная сетка

Fig. 8. Finite element mesh

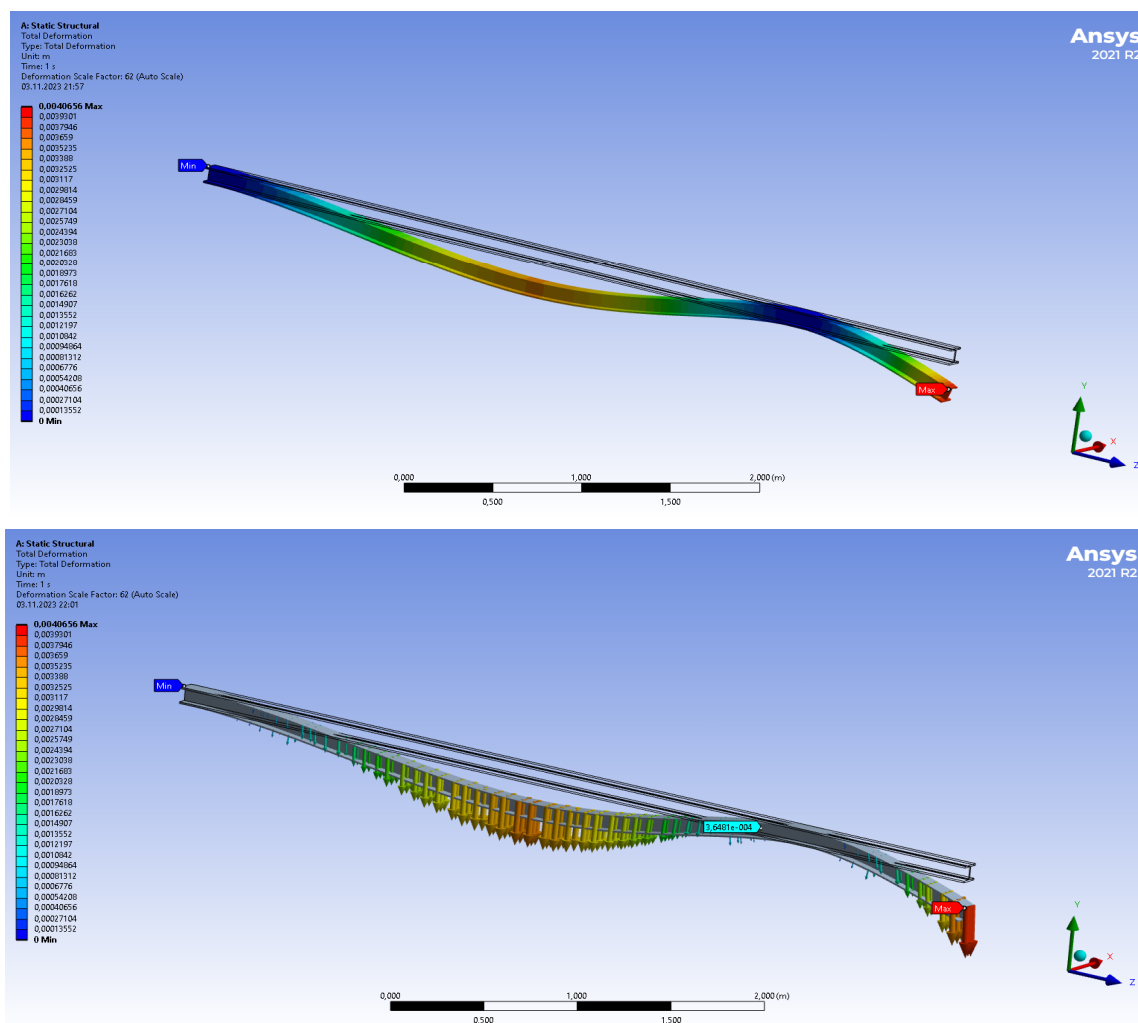


Рис. 9. Деформации в балке от заданной нагрузки  
Fig. 9. Deformations in a beam under a given load

## ВЫВОДЫ

1. Исследование, проведенное в рамках данной работы, посвящено анализу деформаций в таком конструктивном элементе, как киль, представляющем собой двутавровую балку с учетом статической неопределенности.

2. В качестве теоретического исследования выбран метод сил, который представляет собой универсальный инструмент для анализа статически неопределимых балок. Он может быть успешно применен к различным типам балок с разной степенью статической неопределенности.

3. Для экспериментального анализа деформаций в балке использован метод конечных элементов, реализованный с помощью ПК Ansys 2021 R2. Он представляет более гибкий и мощный инструмент для анализа балок и по-

зволяет не только рассчитать деформации, но и визуализировать результаты анализа, что значительно облегчает понимание поведения конструкции под нагрузками. МКЭ подходит для анализа сложных конструкций и учитывает разнообразные граничные условия.

4. Результаты расчетов сопоставлены, погрешности вычислений минимальные и поэтому допустимы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, В. А. Теоретические вопросы управления судном / В. А. Антонов, М. Н. Письменный. Владивосток: МГУ им. Невельского, 2007. 78 с.
2. Дидык, А. Д. Управление судном и его техническая эксплуатация: учеб. для мореходных училищ / А. Д. Дидык, В. Д. Усов, Р. Ю. Титов. М.: Транспорт, 1990. 319 с.

3. Гончарова, Е. А. Применение метода начальных параметров для расчета статически неопределимой балки с жёсткой заделкой [Электронный ресурс] / Е. А. Гончарова; науч. рук. Л. Н. Беляцкая // Перспективные направления развития машиностроения в области мобильных машин, технологического оборудования и энергетических систем: материалы 79-й СНТК, 17–18 мая 2023 г. / БНТУ; редкол.: А. А. Калинина [и др.]; сост.: Е. Д. Рудько, И. Г. Свиридова. Минск: БНТУ, 2023. С. 85–90. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/135571>.
4. Гончарова, С. В. Механика материалов. Расчет статически неопределимых балок [Электронный ресурс]: учеб. пособие / С. В. Гончарова, В. М. Хвасько; БНТУ, каф. «Теоретическая механика и механика материалов». Минск: БНТУ, 2019. 51 с. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/62326>.
5. Реут, Л. Е. Статически неопределимые системы при плоском поперечном изгибе [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студ. машиностроительных специальностей / Л. Е. Реут; БНТУ, кафедра «Теоретическая механика и механика материалов». Минск: БНТУ, 2021. Деп. в БНТУ 15.10.2021, № DEPBNTU-2021-27. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/104396>.
6. Механика материалов: пособие / Ю. В. Василевич [и др.]; БНТУ, кафедра «Теоретическая механика и механика материалов». Минск: БНТУ, 2022. 181 с.
7. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент: ГОСТ 8239–89. Введ. 01.07.90. Мин-во черной металлургии СССР, 1990.
8. Moaveni, S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS / S. Moaveni. NJ: Pearson Education, 2003. 822 p.
9. Lam Thanh Quang, K. Structural Analysis of Continuous Beam using Finite Element Method and ANSYS Software / L. T. Q. Khai, D. T. M. Dung, T. V. Bang // Materials & Constructions. 2021. Vol. 11. № 2. P. 42–48. <https://doi.org/10.54772/jomc.v11i02.291>.
10. Khvasko, V. M. Study of Bending Deformations of a Two-Supported Beam using Ansys 22.2 [Electronic Resource] / V. M. Khvasko, H. M. S. H. Bandara // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: материалы науч.-техн. интернет-конференции, Минск, 21–22 ноября 2022 г. / сост. М. Г. Карасёва. Минск: БНТУ, 2023. С. 191–195. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/127990>.

## REFERENCES

1. Antonov V. A., Pismenny M. N. (2007) *Theoretical Issues of Ship Control*. Vladivostok: Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy. 78 (in Russian).
2. Didyk A. D., Usov V. D., Titov R. Yu. (1990) *Ship Management and Technical Operation*. Moscow, Transport Publ. 319 (in Russian).
3. Goncharova E. A. (2023) Application of the Initial Parameters Method for Calculating a Statically Indeterminate Beam with Rigid Embedding. *Perspektivnye napravleniya razvitiya mashinostroeniya v oblasti mobil'nykh mashin, tekhnologicheskogo oborudovaniya i energeticheskikh sistem: materialy 79-i SNTK, 17–18 maya 2023 g.* [Promising Directions for the Development of Mechanical Engineering in the Field of Mobile Machines, Technological Equipment and Energy Systems: Proceedings of 79<sup>th</sup> CHTK, May 17–18, 2023]. Minsk, Belarusian National Technical University, 85–90. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/135571> (in Russian).
4. Goncharova S. V., Khvasko V. M. (2019) *Mechanics of Materials. Calculation of Statically Indeterminate Beams*. Minsk, Belarusian National Technical University. 51. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/62326> (in Russian).
5. Reut L. E. (2021) *Statically Indeterminate Systems with Plane Transverse Bending*. Minsk, Belarusian National Technical University. Deposited at BNTU on 15.10.2021, No. DEPBNTU-2021-27. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/104396> (in Russian).
6. Vasilevich Yu. V., Reut L. E., Goncharova S. V., Khvas'ko V. M., Chigarev V. A. (2022) *Mechanics of Materials*. Minsk, Belarusian National Technical University. 181 (in Russian).
7. State Standar 8239–89. *Hot-rolled Steel Flange Beams. Rolling Products. Assortment*. Ministry of Ferrous Metallurgy of the USSR (1990) (in Russian).
8. Moaveni S. (2003) *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. NJ, Pearson Education. 822.
9. Lam Thanh Quang K., Do Thi My D., Truong Van B. (2021) Structural Analysis of Continuous Beam using Finite Element Method and ANSYS software. *Materials & Constructions*, 11 (2), 42–48. <https://doi.org/10.54772/jomc.v11i02.291>.
10. Khvasko V. M., Bandara H. M. S. H. (2023) Study of Bending Deformations of a Two-Supported Beam using Ansys 22.2. *Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve: materialy nauch.-tekhn. internet-konferentsii, Minsk, 21–22 noyabrya 2022 g.* [Information Technologies in Education, Science and Production: Proceedings of Scientific and Technical Internet-Conference, Minsk, November 21–22, 2022]. Minsk, Belarusian National Technical University, 191–195. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/127990> (in Russian).

Поступила 18.03.2024

Подписана к печати 21.05.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

Received: 18.03.2024

Accepted: 21.05.2024

Published online: 30.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408>

УДК 627.824

## Основные принципы проектирования резервного водосброса с размываемой вставкой

Канд. техн. наук, доц. П. М. Богославчик<sup>1)</sup>, В. А. Евдокимов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** На основании накопленного к настоящему времени опыта применения резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками и проведенных ранее исследований даны рекомендации по проектированию и расчетам таких сооружений. Представлены четыре варианта конструктивных и компоновочных решений. Первый вариант – размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда – бетонная. Второй вариант – то же, но ограничивающая размыв одежда выполнена из мягкого полимерного материала, например из геотекстиля или полимерной пленки. По третьему варианту размываемая вставка располагается в одном или нескольких пролетах поверхностного водосброса и работает по типу затвора «Гидроплюс». Четвертый вариант применим при соответствующих топографических условиях. Здесь размываемая вставка располагается вне напорного фронта в обход плотины и представляет собой небольшую размываемую дамбу. Предложен порядок гидравлических расчетов, которые выполняются в два этапа. На первом этапе определяют размеры водосбросного отверстия резервного водосброса на пропуск расчетного расхода. Затем выполняют расчет размыва грунтовой вставки, располагаемой в этом отверстии, который происходит при переливе воды через ее гребень при аварийной ситуации. Этот расчет дает возможность определить время размыва, а также построить гидрограф расхода воды через размываемый водосброс, графики изменений уровня верхнего бьефа и отметки гребня вставки в процессе размыва. Дифференциальные уравнения, описывающие процесс размыва, удобно решать численным методом. Предложен алгоритм расчета.

**Ключевые слова:** конструктивные схемы, компоновочные схемы, аварийная ситуация, стадия размыва, затвор «Гидроплюс», ограничивающая размыв одежда, гидрограф расхода, уравнение деформации

**Для цитирования:** Богославчик, П. М. Основные принципы проектирования резервного водосброса с размываемой вставкой / П. М. Богославчик, В. А. Евдокимов // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 404–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408>

## Basic Principles for Designing Backup Spillway with Eroded Insert

P. M. Bohaslauchy<sup>1)</sup>, V. A. Evdokimov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Based on the experience accumulated to date in the use of backup spillways with eroded soil inserts and previously conducted studies, recommendations for the design and calculations of such structures are given. Four options for design and layout solutions are presented. The first option is that the eroded insert is located in the body of the earth dam. The erosion-limiting clothing is concrete. The second option is the same, but the erosion-limiting clothing is made of soft polymer material, for example, from geotextile or polymer film. According to the third option, the eroded insert is located in one or several spans of the surface spillway and operates like a “Hydroplus” gate. The fourth option is applicable under appropriate topographic conditions. Here, the eroded insert is located outside the pressure front, bypassing the dam and is a small eroded dam. A procedure for hydraulic calculations is proposed, which are performed in two stages. At the first stage, the dimensions of the spillway opening of the reserve spillway are determined to allow the design flow to pass through. Then, a calculation is made of the erosion of the soil insert located in this hole, which occurs when water overflows over its crest in an emergency.

### Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: + 375 44 505-90-10  
[pmih@tut.by](mailto:pmih@tut.by)

### Address for correspondence

Bohaslauchy P. M.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Тел.: + 375 44 505-90-10  
[pmih@tut.by](mailto:pmih@tut.by)

This calculation makes it possible to determine the time of erosion, as well as to construct a hydrograph of water flow through the eroded spillway, graphs of changes in the level of the headwaters and the marks of the crest of the insert during the erosion process. It is convenient to solve differential equations that describe the erosion process using a numerical method. A calculation algorithm is proposed.

**Keywords:** structural diagrams, layout diagrams, emergency situation, erosion stage, “Hydroplus” shutter, erosion-limiting clothing, flow hydrograph, deformation equation

**For citation:** Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A. (2024) Basic Principles for Designing Backup Spillway with Eroded Insert. *Science and Technique*. 23 (5), 404–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408> (in Russian)

## Введение

Первые упоминания о резервных водосбросах с размываемыми грунтовыми вставками появились в литературе примерно в 70-е гг. прошлого столетия. Они применялись на крупных гидроузлах с большими паводковыми расходами и назывались чаще всего водосбросами с предохранительными вставками, что наиболее точно отражало их назначение [1, 2]. Применение их на малых гидроузлах впервые начало рассматриваться в 1980-е гг., в то же время появились и первые серьезные исследования таких сооружений [3, 4]. К настоящему времени подобного рода исследований появилось достаточно для того, чтобы сформулировать основные принципы их проектирования.

## Основная часть

При проектировании резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками возникают вопросы, которые можно условно разделить на три части: конструкции, компоновочные решения, расчеты. Напомним принцип работы резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой. Он представляет собой водопропускное отверстие в напорном фронте, перекрытое грунтовой вставкой, отсыпанной из песчаного грунта [3]. Отметка гребня вставки несколько ниже отметки гребня основных подпорных сооружений. При аварийной ситуации, когда уровень верхнего бьефа по каким-то причинам поднимается выше критических отметок, происходит перелив через вставку и ее размыв. В освободившееся отверстие сбрасывается излишний расход. Конструктивные и компоновочные схемы такого сооружения могут быть следующими:

- 1) размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда – бетонная (рис. 1);
- 2) размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда из мягкого полимерного материала, например из геотекстиля или полимерной пленки (рис. 2);

3) размываемая вставка располагается в одном или нескольких пролетах поверхностного водосброса (рис. 3). В этом случае вставка работает как затвор «Гидроплюс» [5];

4) размываемая вставка располагается вне напорного фронта в обход плотины (рис. 4).

Цель гидравлических расчетов – определение размеров водопропускного отверстия, времени размыва грунтовой вставки, предельного повышения уровня верхнего бьефа при установленных выше размерах водопропускного отверстия, а также построение гидрографа расхода через рассматриваемый водосброс.

Алгоритм расчета разработан на основе исследований, результаты которых опубликованы в [4, 6]. В соответствии с характером работы водосброса расчет следует условно разделить на несколько этапов.

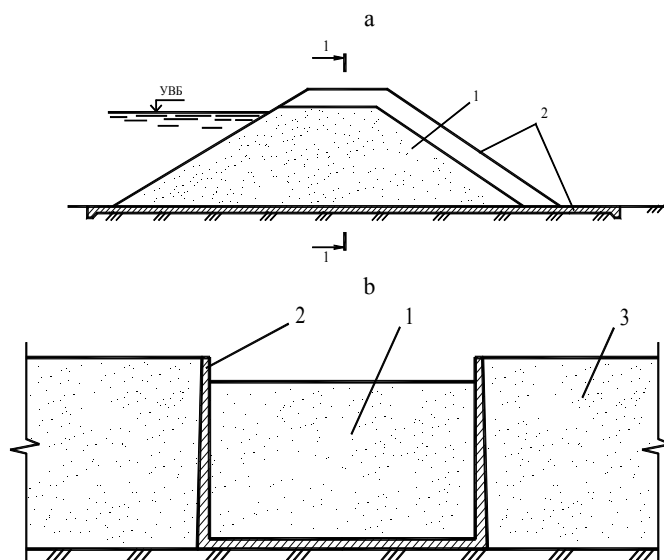


Рис. 1. Водосброс с размываемой грунтовой вставкой с ограничивающей размыв бетонной одеждой: а – поперечный разрез; б – продольный разрез 1–1;

1 – размываемая вставка;

2 – ограничивающая размыв одежда

Fig. 1. Spillway with eroded soil insert and erosion-limiting concrete pavement: а – cross section; б – longitudinal section 1–1;

1 – eroded insert; 2 – limiting-erosion clothing

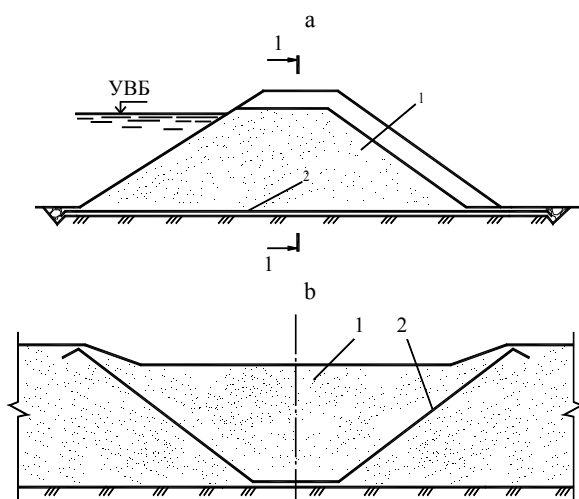


Рис. 2. Водосброс с размываемой грунтовой вставкой с ограничивающей размыв одеждой из мягкого полимерного материала: а – поперечный разрез; б – продольный разрез 1–1; 1 – размываемая вставка; 2 – геотекстиль или полимерная пленка; УВБ – уровень верхнего бьефа

Fig. 2. Spillway with eroded soil insert and erosion-limiting clothing made of soft polymer material: a – cross section; b – longitudinal section 1–1; 1 – eroded insert; 2 – geotextile or polymer film; УВБ – headwaters level

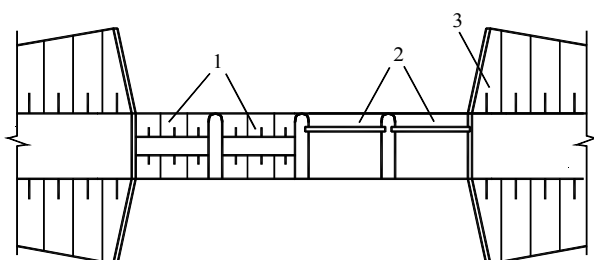


Рис. 3. Компоновка с размываемой вставкой в пролетах поверхностного водосброса: 1 – размываемая вставка; 2 – регулируемые пролеты поверхностного водосброса

Fig. 3. Layout with eroded insert in the spans of the surface spillway: 1 – eroded insert; 2 – adjustable spans of surface spillway

На 1-м этапе определяют размеры водопропускного отверстия. Ширина отверстия может быть определена из условия пропуска расчетного расхода  $Q_p$  из следующей формулы (по аналогии с расчетом пропускной способности прорана при пионерном перекрытии русла [7]):

$$Q_p = mb\sqrt{2gH_0^{1.5}}, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент расхода;  $b$  – ширина водопропускного отверстия;  $H_0$  – напор с учетом скорости подхода.

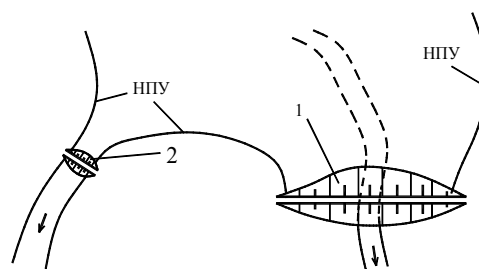


Рис. 4. Пример компоновки с размываемой вставкой в обход плотины: 1 – подпорное сооружение; 2 – размываемая дамба; НПУ – нормальный подпорный уровень

Fig. 4. Layout with eroded insert bypassing the dam: 1 – retaining structure; 2 – eroded dam; НПУ – normal retaining level

Расчетная схема представлена на рис. 5. Коэффициент расхода при  $z/H \leq 0,35$  рекомендуется определять по формуле

$$m = \left(1 - \frac{z}{H_0}\right) \sqrt{\frac{z}{H}}, \quad (2)$$

где  $z$  – перепад уровней верхнего и нижнего бьефов.

При  $z/H > 0,35$  следует принимать  $m = 0,385$  [7]. Ширину водопропускного отверстия  $b$  при трапециевидальной форме можно принимать средней по высоте.

После определения размеров водопропускного отверстия следует выполнить расчет размыва вставки. Целью расчетов является: во-первых, определить предельное повышение уровня верхнего бьефа при установленных выше размерах водопропускного отверстия; во-вторых, построить гидрограф расхода через рассматриваемый водосброс.

Экспериментально установлено, что физическая картина размыва существенно зависит от скорости повышения уровня верхнего бьефа. При быстром повышении размыв происходит с одинаковой интенсивностью одновременно по всей ширине вставки. При медленном повышении уровня верхнего бьефа размыв может начаться в одной точке, после чего образуется небольшой проран, который постепенно увеличивается как в глубину, так и в ширину. Применительно к водосбросам более опасным для гидроузла является первый случай, то есть случай быстрого повышения уровня верхнего бьефа. Поэтому дальше рассматривается только этот случай.

Как было установлено ранее [4], размыв вставки начинается со стороны низового откоса и до полного размыва низовой призмы  $ABCD$  (рис. 6) отметка гребня размываемого водослива со стороны верховой бровки остается постоянной.

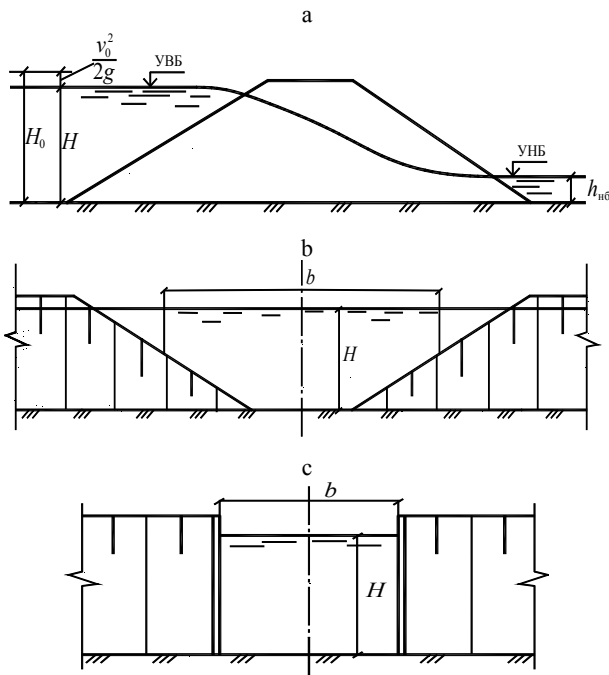


Рис. 5. Расчетная схема к определению размеров водопропускного отверстия: а – поперечный разрез; б – трапециoidalное отверстие; с – прямоугольное отверстие; УВБ – уровень верхнего бьефа; УНБ – уровень нижнего бьефа

Fig. 5. Design diagram for sizing culvert: a – cross section; b – trapezoidal hole; c – rectangular hole; УВБ – headwaters level; УНБ – tailwaters level

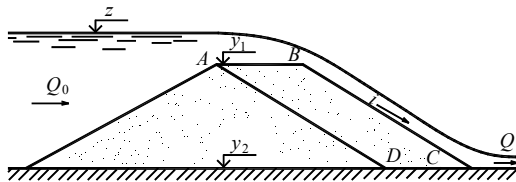


Рис. 6. Схема к расчету размыва вставки  
Fig. 6. Scheme for calculating insert erosion

Уравнение деформации для этой стадии размыва имеет вид [8]

$$\frac{dM}{dt} = 0,055 \frac{m^{1,45} i^{1,275} (2g)^{0,725}}{n^{2,55}} (z - y)^{2,175}, \quad (3)$$

где  $M$  – масса размываемого грунта, кг;  $t$  – время, с;  $m$  – коэффициент расхода размываемого водослива, на первой стадии определяется как для водослива с широким порогом;  $i$  – уклон дна по низовому откосу;  $n$  – коэффициент шероховатости, рекомендуется определять по формуле В. Н. Гончарова, а именно  $n = 0,0324d^{0,125}$  [9];  $z$  – уровень верхнего бьефа;  $y$  – отметка гребня размываемой плотины (для данной стадии размыва  $y = y_1 = \text{const}$ ).

Изменение уровня верхнего бьефа описывается следующей формулой:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q}{F(z)}, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – расход воды в верхнем бьефе, м<sup>3</sup>/с;  $F(z)$  – площадь зеркала воды в верхнем бьефе на отметке  $z$ , м<sup>2</sup>.

Расход воды через размываемую вставку  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле

$$Q = \sigma m b \sqrt{2g} (z - y)^{1,5}. \quad (5)$$

После размыва низовой призмы начинаются интенсивный размыв гребня и снижение отметки  $y$ . Уравнение деформации для этой стадии размыва имеет следующий вид [6]:

$$\frac{dy}{dt} = -\sigma \frac{B m^{0,43} \varepsilon_1}{\rho_1} (z - y)^{0,6}, \quad (6)$$

где  $B = 6,77(1 + \varphi) d g^{2,17} \left( \frac{5,64 n \sqrt{2g}}{\varphi w} \right)^{3,33}$ ;

$$\varepsilon_1 = \frac{1 - 1,26 m^{2/3}}{\beta} 2g;$$

$\sigma$  – коэффициент подтопления;  $\rho_0$  – плотность грунта тела плотины, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – средний диаметр частиц размываемого грунта, м;  $\varphi$  – параметр турбулентности (отношение расчетной скорости падения частицы в воде к ее действительной гидравлической крупности), в соответствии с рекомендациями [10] для мелкозернистых песков принимается равным 2,25;  $\beta$  – коэффициент, принимаемый для песчаных грунтов равным 1,5–2,0; коэффициент расхода  $m$  на этой стадии размыва определяется как для безвакуумного водослива практического профиля.

В отличие от методики, изложенной в [6, 8], ширина  $b$  является величиной заданной, так как размыв в случае быстрого повышения уровня верхнего бьефа происходит по всей ширине водосбросного отверстия.

Расчеты по формулам (3)–(6) удобно вести численным методом, а именно методом конечных разностей. Задаются интервалом времени  $\Delta t$ . Начальный момент времени  $t = 0$  – это момент, когда уровень верхнего бьефа при его повышении становится равным отметке гребня размываемой вставки, т. е.  $z = y$ . По окончании каждого интервала времени  $t + \Delta t$  определяют  $z$ ,  $Q$ ,  $\Delta M$ . При  $\Sigma \Delta M = M_0$ , где  $M_0$  – масса низовой призмы  $ABCD$ , переходят к расчету по

формуле (6). По расчетам строятся графики:  $z = f(t)$ ;  $y = f(t)$ ;  $Q = f(t)$ . Отметка  $z$  в какой-то момент не должна достигать величины, опасной для гидроузла. В противном случае следует увеличить ширину отверстия и расчеты повторить.

### ВЫВОДЫ

1. Анализ опыта применения резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками позволил выделить четыре конструктивно-компоновочные схемы этих сооружений, которые дают основание для разработки проектных решений в зависимости от конкретных топографических и технологических условий.

2. Приведен порядок гидравлических расчетов, целью которых является определение размеров водопропускного отверстия, а также гидравлических параметров процесса размыва грунтовой вставки. Полученный в результате расчетов гидрограф расходов в створе размываемого водосброса  $Q = f(t)$  позволяет при необходимости прогнозировать процессы в нижнем бьефе, а график изменения уровня верхнего бьефа во времени  $z = f(t)$  позволяет определить максимальные уровни, которые не должны превышать предельно допустимые.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование и строительство больших плотин: материалы IX Международного конгресса по большим плотинам. Вып. 2: Постоянные и временные водосбросные сооружения / сост. М. Б. Гинзбург. М.: Энергия, 1972. 155 с.
2. Murti, N. G. K. Breaching Sections / N. G. K. Murti // *Irrigation and Power*. 1978. Vol. 35, No 3. P. 341–363.
3. Филиппович, И. В. Водосброс по типу размываемой вставки / И. В. Филиппович, П. М. Богославчик // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1982. Вып. 12. С. 96–100.
4. Богославчик, П. М. Гидравлический расчет резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1990. Вып. 19. С. 24–30.
5. Лунаци, М. Э. Затворы системы «Гидроплюс» как фактор повышения безопасности и экономичности гидроузлов / М. Э. Лунаци, Г. Ф. Онирченко, В. Б. Родионов // *Безопасность энергетических сооружений*. М: ОАО «НИИЭС», 1998. Вып. 2; 3. С. 89–99.
6. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 313 с.
8. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>.

9. Богославчик, П. М. К определению коэффициента шероховатости при расчете размыва грунтовых вставок / П. М. Богославчик // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1989. Вып. 18. С. 74–76.
10. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.

Поступила 18.12.2023

Подписана в печать 20.02.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

### REFERENCES

1. Ginzburg M. B. [compiler] (1972) *Design and Construction of Large Dams. Proceedings of the 9th International Congress on Large Dams. Issue 2. Permanent and temporary spillway structures*. Moscow, Energiya Publ. 155 (in Russian).
2. Murti N. G. K. (1978) Breaching Sections. *Irrigation and Power*, 35 (3), 341–363.
3. Filippovich I. V., Bogoslavchik P. M. (1982) Spillway by Type of Blurred Insert. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 12* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 12]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ., 96–100 (in Russian).
4. Bogoslavchik P. M. (1990) Hydraulic calculation of a reserve spillway with an eroded soil insert. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 19* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 19]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ., 24–30 (in Russian).
5. Lunatsi M. E., Onirchenko G. F., Rodionov V. B. (1998) Gates of the “Hydroplus” System as a Factor in Increasing the Safety and efficiency of Waterworks. *Bezopasnost Energeticheskikh Sooruzheniy*. Vyp. 2; 3 [Safety of Energy Structures. Iss. 2; 3. Moscow, JSC Research Institute of Energy Constructions, 89–99 (in Russian).
6. Bogoslavchik P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (4), 292–296 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.
7. Kiselev P. G. (ed.), Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1974) *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 313 (in Russian).
8. Ivashechkin V. V., Bohaslauchyk P. M., Veremenyuk V. V., Nemeravets O. V. (2022) Theoretical Foundations for Calculating the Erosion of Soil Dams during Overflow of Water over the Ridge. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 65 (3), 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284> (in Russian).
9. Bogoslavchik P. M. (1989) Towards the Determination of the Roughness Coefficient When Calculating the Erosion of Soil Inserts. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 18* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 18]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ., 74–76 (in Russian).
10. Goncharov V. L. (1962) *Dynamics of Channel Flows*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ. 373 (in Russian).

Received: 18.12.2023

Accepted: 20.02.2024

Published online: 30.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416>

УДК 625.85.06

## Методика оценки адгезионных связей вяжущего с каменным материалом на основе вакуумно-температурного воздействия

Магистр техн. наук П. П. Яцевич<sup>1)</sup>, А. А. Афанасенко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Если рассматривать асфальтобетон как композитный строительный материал, состоящий из разнородных составляющих различной природы и свойств, весьма важными являются обеспечение и контроль связи матрицы вяжущего и минерального каркаса. Это напрямую влияет на наиболее важные технологические и прочностные свойства итогового материала и продолжительность срока службы асфальтобетонного дорожного покрытия. Наиболее распространенным методом оценки адгезионных связей является визуальное сравнение асфальтобетонной смеси, прокипяченной в воде при заданной температуре, с изображением эталонного образца. На наш взгляд, такой метод контроля является весьма субъективным, так как напрямую на результат испытания влияет визуальное восприятие исследователем изображения. Нами разработана и описана методика испытаний, которая позволяет получить объективную картину, основанную на изменении значений показателя водонасыщения под вакуумно-температурным воздействием. По разработанной методике проведены исследования адгезионных свойств вяжущего до и после модификации различными полимерами и их компаундов к каменному материалу. Для исследований были выбраны асфальтобетонные смеси, которые наиболее часто применяются в качестве материала покрытия верхних слоев дорожных одежд в Республике Беларусь. Анализ полученных данных показал зависимость риска проникновения воды между битумом и каменным материалом с потерей адгезии вяжущего к заполнителю от развитости каркаса и толщины битумной пленки. Объяснение этого явления состоит в том, что процент когезионного расслоения значительно увеличивается с ростом толщины пленки битума и может достигать 65 % когезионного отслоения. При этом, как показали результаты исследования, предварительная модификация битума значительно снижает негативные последствия вакуумно-температурного воздействия на асфальтобетон.

**Ключевые слова:** асфальтобетонная смесь, асфальтобетон, адгезия, водонасыщение, термопласты, эластопласты, модификация битума, модификация асфальтобетона, композитный материал, стирол-бутадиен-стирол, бутадиен-стирольный каучук

**Для цитирования:** Яцевич, П. П. Методика оценки адгезионных связей вяжущего с каменным материалом на основе вакуумно-температурного воздействия / П. П. Яцевич, А. А. Афанасенко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 409–416. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416>

## Methodology for Assessing Adhesive Bonds of Binder with Stone Material Based on Vacuum-Temperature Effects

P. P. Yatsevich<sup>1)</sup>, A. A. Afanasenka<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** If we consider asphalt concrete as a composite building material, consisting of heterogeneous components of different nature and properties, ensuring and controlling the connection between the matrix of the binder and the mineral frame is very important. This directly affects the most important technological and strength properties of the final material and

### Адрес для переписки

Яцевич Павел Петрович  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 338-78-40  
cniidsgm@bntu.by

### Address for correspondence

Yatsevich Pavel P.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 338-78-40  
cniidsgm@bntu.by

the service life of the asphalt concrete road surface. The most common method for assessing adhesive bonds is a visual comparison of an asphalt concrete mixture boiled in water at a given temperature with an image of a reference sample. In our opinion, this control method is very subjective, since the test result is directly influenced by the researcher's visual perception of the image. We have developed and described a test method that allows us to obtain an objective picture based on changes in the values of the water saturation index under vacuum-temperature influence. Using the developed methodology, studies were carried out on the adhesive properties of the binder before and after modification with various polymers and their compounds to stone material. For the research, asphalt concrete mixtures were selected, which are most often used as a coating material for the top layers of road pavements in the Republic of Belarus. Analysis of the data obtained showed the dependence of the risk of water penetration between bitumen and stone material with loss of adhesion of the binder to the aggregate on the development of the frame and the thickness of the bitumen film. The explanation for this phenomenon is that the percentage of cohesive delamination increases significantly with increasing bitumen film thickness and can reach 65% of cohesive delamination. At the same time, as the results of the study showed, preliminary modification of bitumen significantly reduces the negative consequences of vacuum-temperature effects on asphalt concrete.

**Keywords:** asphalt concrete mixture, asphalt concrete, adhesion, water saturation, thermoplastics, elastomers, bitumen modification, asphalt concrete modification, composite material, styrene-butadiene-styrene, styrene-butadiene rubber

**For citation:** Yatsevich P. P., Afanasenka A. A. (2024) Methodology for Assessing Adhesive Bonds of Binder with Stone Material Based on Vacuum-Temperature Effects. *Science and Technique*. 23 (5), 409–416. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416> (in Russian)

## Введение

Адгезия битума – это свойство образовывать прочное сцепление с поверхностью минеральных материалов, что позволяет создавать стойкие и долговечные соединения внутри структуры асфальтобетона [1]. Так как асфальтобетон – это композитный материал, способность его составных элементов надежно соединяться между собой напрямую влияет на прочность всей композиции в целом. Адгезионные свойства критичны при возникновении растягивающих напряжений [2], которые присутствуют при любых видах нагружения материала [3].

Модификация битума, в частности различными видами термопластов, обычно хоть незначительно, но положительно сказывается на адгезионных свойствах вяжущего [4]. Особенно это проявляется при длительном воздействии высоких положительных температур [5]. Как показано в исследованиях [6], если рассматривать битум как систему, состоящую из асфальтенов, смол, ароматических углеводородов и насыщенных углеводородов, адгезия между асфальтенами и заполнителем является самой сильной, а связь между ароматическими соединениями и заполнителем – самой слабой. При этом следует учитывать, что при модификации битума СБС (стирол-бутадиен-стирол) и СБР (стирол-бутадиеновый каучук) полимеры наиболее активно взаимодействуют именно с асфальтеновой фракцией битума.

В настоящее время для определения адгезии битума к минеральной составляющей асфаль-

тобетонных смесей в основном используются такие визуальные методы, как метод определения сцепления битума с мраморным песком и метод определения сцепления битума с мраморным песком на сетке, а также инструментальные, такие как метод определения водостойкости асфальтобетона (TSR) и метод определения водостойкости при длительном водонасыщении. Визуальные методы являются субъективными, так как полностью зависят от визуального восприятия лаборантом контрольных образцов. В последнее время проводятся исследования [7] для усовершенствования этих методов и исключения человеческого фактора при обработке результатов испытания. На инструментальные методы косвенно влияют прочностные свойства испытуемого асфальтобетона, что может приводить к необъективности получаемых результатов. В работе [8] наглядно продемонстрировано расхождение результатов испытаний при выполнении экспериментов по различным методикам.

## Методика проведения исследований

Предлагаем оценивать адгезию модифицированного битума к минеральному наполнителю путем выявления такого фактора, как проникновение воды под битумную пленку в асфальтобетоне при различных температурах при остаточном давлении 2000 Па. Преимущество этого метода состоит в том, что он приближает условия проведения испытаний к реальным условиям работы асфальтобетона в покрытии. Отличие от стандартизированного метода ис-

пытаний заключается в том, что сосуд с водой из вакуумной установки помещается в тепло-изолированный водонепроницаемый короб, оснащенный функцией подогрева, и термостатируется в процессе всего испытания при заданных температурах. Это позволяет получить значения количества поглощаемой образцом воды при остаточном давлении 2000 Па и заданной температуре.

Исследования проводились на трех типах асфальтобетонных смесей, которые наиболее часто используются в верхнем слое дорожного покрытия: щебеночной мелкозернистой горячей типа С, щебеночной мелкозернистой горячей типа А, щебеночной мелкозернистой горячей типа Б. Выбор обусловлен тем, что именно верхний слой покрытия наиболее интенсивно подвергается воздействию климатических факторов и именно для него в наибольшей степени критична адгезия битума к минеральной части. Минеральные части асфальтобетонных смесей проектировались в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами Республики Беларусь.

В качестве модифицирующих добавок применялись:

- В II – MF ТУ ВУ 690610504.001-2012;
- многокомпонентная модифицирующая полимерная добавка универсального применения (ММД2П);
- смесь полиэтиленов (агломерат стрейч-пленки);
- стирол-бутадиен-стирол;
- стирол-бутадиеновый каучук.

Все модификаторы вводились в состав асфальтобетонной смеси путем предварительной модификации битума при содержании модифи-

цирующей добавки в количестве 4 % по массе в пересчете на чистый полимер.

В соответствии с методикой [9] для достижения доверительной вероятности 0,95 при гарантийном коэффициенте, принимаемом по функции Лапласа, требуется испытать четыре образца для определения показателя водонасыщения.

Смесь щебеночная мелкозернистая типа С подобрана на щебне фракции от 5 до 10 мм РУПП «Гранит», песках из отсеков дробления РУПП «Гранит», минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа С представлен на рис. 1 и в табл. 1.

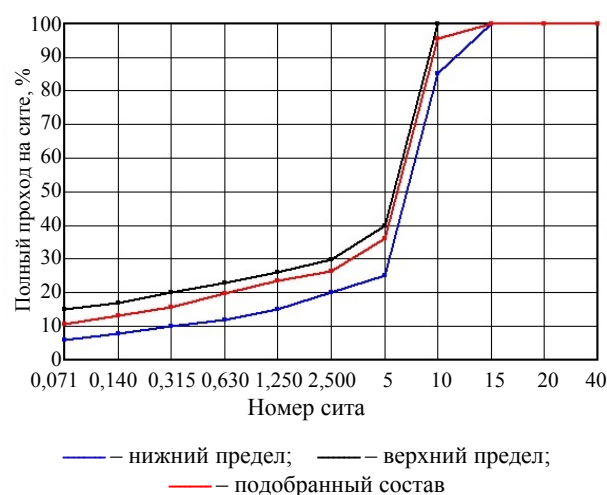


Рис. 1. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа С

Fig. 1. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of C-type

Таблица 1

Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа С

Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of C-type

| Номер сита | Гранулометрический состав |       |       |                    |      |       | Сумма, % | Полный остаток, % | Полный проход, % |
|------------|---------------------------|-------|-------|--------------------|------|-------|----------|-------------------|------------------|
|            | материалов                |       |       | материалов в смеси |      |       |          |                   |                  |
|            | 1                         | 2     | 3     | 1                  | 2    | 3     |          |                   |                  |
| 10         | 5,87                      | 1,35  | 0     | 4,23               | 0,20 | 0     | 4,43     | 4,43              | 95,57            |
| 5          | 80,44                     | 9,44  | 0     | 57,92              | 1,42 | 0     | 59,33    | 63,76             | 36,24            |
| 2,5        | 8,49                      | 24,57 | 0     | 6,11               | 3,69 | 0     | 9,80     | 73,56             | 26,44            |
| 1,25       | 1,20                      | 14,11 | 0     | 0,86               | 2,12 | 0     | 2,98     | 76,54             | 23,46            |
| 0,63       | 0,93                      | 17,32 | 2,50  | 0,67               | 2,60 | 0,33  | 3,59     | 80,13             | 19,87            |
| 0,315      | 0,71                      | 20,84 | 4,17  | 0,51               | 3,13 | 0,54  | 4,18     | 84,31             | 15,69            |
| 0,14       | 0,80                      | 7,87  | 5,00  | 0,58               | 1,18 | 0,65  | 2,41     | 86,72             | 13,28            |
| 0,071      | 1,09                      | 3,12  | 10,83 | 0,78               | 0,47 | 1,41  | 2,66     | 89,38             | 10,62            |
| <0,071     | 0,47                      | 1,38  | 77,50 | 0,34               | 0,21 | 10,07 | 10,62    | 100               | —                |

Смесь щебеночная мелкозернистая типа А была подобрана на щебне фракций от 10 до 14 мм ОАО «МАКРОДОР», от 5 до 15 мм РУПП «Гранит», от 4 до 6,3 мм ОАО «МАКРОДОР» и от 2 до 4 мм ОАО «МАКРОДОР», песках из отсеков дробления ОАО «МАКРОДОР», минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 2 и в табл. 2.

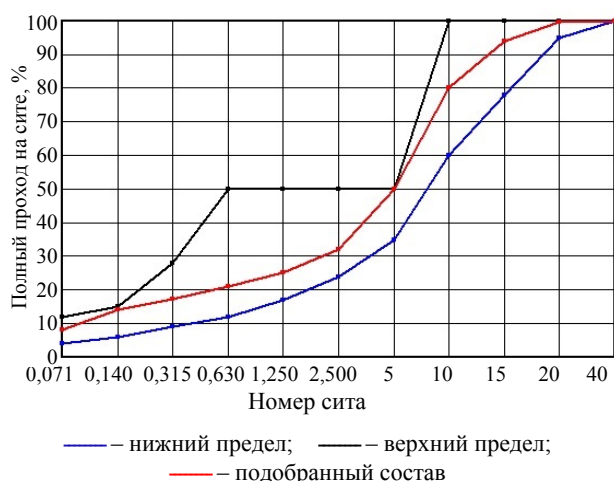


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа А

Fig. 2. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of A-type

Смесь щебеночная мелкозернистая типа Б подобрана на щебне фракций от 5 до 20 мм и от 5 до 10 мм РУПП «Гранит», песках из отсеков дробления РУПП «Гранит», песках природных, минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа Б представлен на рис. 3 и в табл. 3.

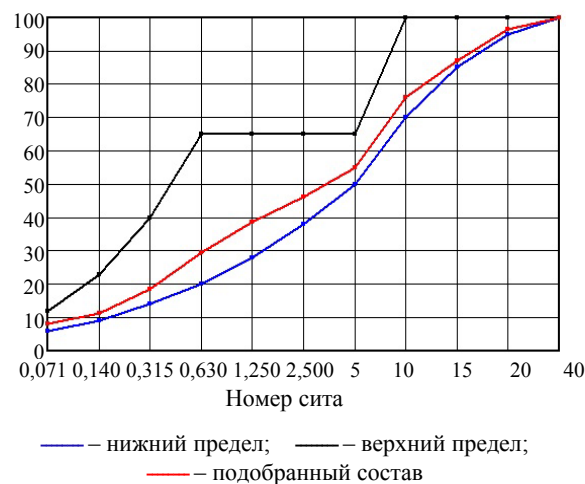


Рис. 3. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа Б

Fig. 3. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of B-type

Таблица 2

Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа А  
Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of A-type

| Номер<br>сита | Гранулометрический состав |       |       |       |       |       |                    |      |       |       |      |      | Сумма,<br>% | Полный<br>остаток,<br>% | Полный<br>проход, % |
|---------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------|-------|-------|------|------|-------------|-------------------------|---------------------|
|               | материалов                |       |       |       |       |       | материалов в смеси |      |       |       |      |      |             |                         |                     |
|               | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 1                  | 2    | 3     | 4     | 5    | 6    |             |                         |                     |
| 20            | 4,59                      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,55               | 0    | 0     | 0     | 0    | 0    | 0,55        | 0,55                    | 99,45               |
| 15            | 46,62                     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 5,59               | 0    | 0     | 0     | 0    | 0    | 5,59        | 6,15                    | 93,85               |
| 10            | 48,31                     | 64,74 | 3,54  | 0     | 0     | 0     | 5,80               | 7,12 | 0,99  | 0     | 0    | 0    | 13,91       | 20,05                   | 79,95               |
| 5             | 0,32                      | 35,05 | 90,13 | 5,21  | 0,03  | 0     | 0,04               | 3,86 | 25,24 | 0,89  | 0,01 | 0    | 30,02       | 50,08                   | 49,92               |
| 2,5           | 0,01                      | 0     | 5,51  | 89,86 | 3,76  | 0     | 0                  | 0    | 1,54  | 15,28 | 0,94 | 0    | 17,76       | 67,84                   | 32,16               |
| 1,25          | 0,01                      | 0     | 0,32  | 4,17  | 24,79 | 0     | 0                  | 0    | 0,09  | 0,71  | 6,20 | 0    | 7,00        | 74,84                   | 25,16               |
| 0,63          | 0,01                      | 0     | 0,23  | 0,07  | 15,43 | 2,50  | 0                  | 0    | 0,06  | 0,01  | 3,86 | 0,17 | 4,11        | 78,95                   | 21,05               |
| 0,315         | 0                         | 0     | 0,08  | 0,07  | 13,85 | 4,17  | 0                  | 0    | 0,02  | 0,01  | 3,46 | 0,29 | 3,79        | 82,73                   | 17,27               |
| 0,14          | 0,01                      | 0     | 0,04  | 0,15  | 11,37 | 5,00  | 0                  | 0    | 0,01  | 0,03  | 2,84 | 0,35 | 3,23        | 85,96                   | 14,04               |
| 0,071         | 0,06                      | 0,09  | 0,06  | 0,37  | 20,53 | 10,83 | 0,01               | 0,01 | 0,02  | 0,06  | 5,13 | 0,76 | 5,99        | 91,95                   | 8,05                |
| <0,071        | 0,06                      | 0,12  | 0,09  | 0,10  | 10,24 | 77,50 | 0,01               | 0,01 | 0,03  | 0,02  | 2,56 | 5,42 | 8,05        | 100                     | —                   |

Таблица 3

**Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа Б**  
**Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of B-type**

| Номер сита | Гранулометрический состав |       |       |       |       |                    |      |      |      |      | Сумма, % | Полный остаток, % | Полный проход, % |
|------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------|------|------|------|----------|-------------------|------------------|
|            | материалов                |       |       |       |       | материалов в смеси |      |      |      |      |          |                   |                  |
|            | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 1                  | 2    | 3    | 4    | 5    |          |                   |                  |
| 20         | 11,42                     | 0     | 0     | 0     | 0     | 3,54               | 0    | 0    | 0    | 0    | 3,54     | 3,54              | 96,46            |
| 15         | 29,94                     | 3,18  | 0     | 0     | 0     | 9,28               | 0,25 | 0    | 0    | 0    | 9,54     | 13,08             | 86,92            |
| 10         | 26,59                     | 6,80  | 3,17  | 4,45  | 0     | 8,24               | 0,54 | 0,89 | 1,20 | 0    | 10,88    | 23,95             | 76,05            |
| 5          | 24,63                     | 85,17 | 15,59 | 8,33  | 0     | 7,64               | 6,81 | 4,37 | 2,25 | 0    | 21,06    | 45,02             | 54,98            |
| 2,5        | 1,89                      | 1,62  | 23,21 | 6,01  | 0     | 0,59               | 0,13 | 6,50 | 1,62 | 0    | 8,84     | 53,85             | 46,15            |
| 1,25       | 1,14                      | 0,14  | 15,20 | 10,27 | 0     | 0,35               | 0,01 | 4,26 | 2,77 | 0    | 7,39     | 61,25             | 38,75            |
| 0,63       | 0,85                      | 1,14  | 14,25 | 17,45 | 2,50  | 0,26               | 0,09 | 3,99 | 4,71 | 0,15 | 9,21     | 70,45             | 29,55            |
| 0,315      | 0,64                      | 0,28  | 11,37 | 27,46 | 4,17  | 0,20               | 0,02 | 3,18 | 7,41 | 0,25 | 11,07    | 81,52             | 18,48            |
| 0,14       | 0,73                      | 0,36  | 7,56  | 16,13 | 5,00  | 0,23               | 0,03 | 2,12 | 4,36 | 0,30 | 7,03     | 88,55             | 11,45            |
| 0,071      | 0,05                      | 0,34  | 6,35  | 3,18  | 10,83 | 0,02               | 0,03 | 1,78 | 0,86 | 0,65 | 3,33     | 91,88             | 8,12             |
| <0,071     | 2,12                      | 0,97  | 3,30  | 6,72  | 77,50 | 0,66               | 0,08 | 0,92 | 1,81 | 4,65 | 8,12     | 100               | —                |

### Результаты испытаний

Испытания контрольного образца щебеночной мелкозернистой смеси типа С показали (табл. 4), что значение водонасыщения в температурных пределах от 10 до 40 °С не показывает бурного роста, а изменяется в пределах величин, допустимых регламентируемым стандартом на асфальтобетон. При температурах 50 и 60 °С образцы поглощают значительно большее количество воды. Это объясняется ее проникновением между пленкой битума и каменным материалом, что приводит к потере сцепных качеств между матрицей и каркасом, а следовательно, материал становится значительно менее восприимчив к различным напряжениям, возникающим в слое покрытия (табл. 4).

Таблица 4

**Результаты испытаний контрольных образцов щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа С**  
**Test results of control samples of crushed stone fine-grained asphalt concrete of C-type**

| Вид испытания                                | Температура определения показателя водонасыщения образца, °С |     |     |     |     |      |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|                                              | 10                                                           | 20  | 30  | 40  | 50  | 60   |
| Значение показателя водонасыщения образца, % | 1,5                                                          | 1,6 | 2,1 | 3,7 | 6,2 | 11,9 |

Испытания образцов щебеночной мелкозернистой смеси типа С, изготовленных с применением модифицированных битумов, показали схожие результаты в диапазоне температур от 10 до 40 °С. При этом в интервале температур от 50 до 60 °С модифицированный асфальтобетон показал лучшую сопротивляемость проникновению воды под битумную пленку. Это объясняется тем, что модифицированное вяжущее само по себе лучше сопротивляется повышенным температурам, чем вяжущее на товарном битуме. Кроме того, на результат могло повлиять и то, что модификаторы создают в матрице дополнительную полимерную подсистему, которая, как сетка, прижимает вяжущее к каменному материалу. Худший результат среди модифицированных асфальтобетонов показал экспериментальный образец с применением смеси полиэтиленов. Это можно объяснить тем, что полиэтилены в соответствии с параметрами растворимости не взаимодействуют с битумом, а лишь распределяются в его объеме, поэтому асфальтовая сетка не укрепляется. Этому может служить подтверждением и то, что образцы, модифицированные СБР и СБС, показали значительно лучшие результаты в интервале высоких температур именно из-за того, что при модификации ими происходит химическое взаимодействие с би-

тумом, при этом стирольная и бутадиеновая части способствуют укрупнению и набуханию асфальтеновой части битума. Результаты испытаний представлены в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5

**Результаты испытаний модифицированных щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа С**  
**Test results of modified crushed stone fine-grained asphalt concrete of C-type**

| Вид испытания                                | Температура определения показателя водонасыщения образца, °С |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                              | 10                                                           | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  |
| Значение показателя водонасыщения образца, % | Смесь, модифицированная В II, – MF TU BY 690610504.001–2012  |     |     |     |     |     |
|                                              | 1,5                                                          | 1,6 | 1,9 | 2,4 | 3,7 | 5,8 |
|                                              | Смесь, модифицированная ММД2П                                |     |     |     |     |     |
|                                              | 1,5                                                          | 1,7 | 2,8 | 3,9 | 5,1 | 6,8 |
|                                              | Смесь, модифицированная смесью полиэтиленов                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 1,8                                                          | 2   | 3,4 | 4,9 | 6,6 | 8,1 |
|                                              | Смесь, модифицированная СБС                                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 1,7                                                          | 1,6 | 1,8 | 2,1 | 3,2 | 5,0 |
|                                              | Смесь, модифицированная СБР                                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 1,6                                                          | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 3,8 | 5,4 |

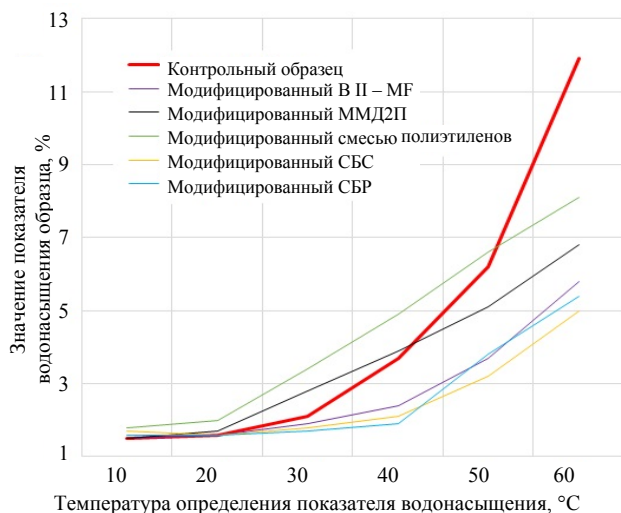


Рис. 4. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа С

Fig. 4. Summary graph of changes in the values of water saturation index of sample and modified asphalt concrete of C-type

Аналогичные испытания проводились для асфальтобетонов типов А и Б (табл. 6, 7 и 8). Картина изменения значений показателя водо-

насыщения была почти аналогична, за исключением того, что значительный рост отмечался уже при температуре 40 °С, за исключением асфальтобетона, модифицированного смесью полиэтиленов. Еще одной особенностью было то, что разница в значениях при испытаниях при 20, 50 и 60 °С не была столь значительной, как на примере асфальтобетона типа С.

Таблица 6

**Результаты испытаний контрольных образцов щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типов А и Б**

**Test results of control samples of crushed stone fine-grained asphalt concrete of A- and B-types**

| Вид испытания                                | Температура определения показателя водонасыщения образца, °С        |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                              | 10                                                                  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  |
| Значение показателя водонасыщения образца, % | Смесь щебеночная мелкозернистая горячая типа А, контрольный образец |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,1                                                                 | 2,1 | 2,5 | 3,8 | 5,1 | 6,9 |
|                                              | Смесь щебеночная мелкозернистая горячая типа Б, контрольный образец |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,6                                                                 | 2,6 | 3,1 | 4,7 | 6,3 |     |

Таблица 7

**Результаты испытаний модифицированных щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа А**  
**Test results of modified crushed stone fine-grained asphalt concrete of A-type**

| Вид испытания                                | Температура определения показателя водонасыщения образца, °С |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                              | 10                                                           | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  |
| Значение показателя водонасыщения образца, % | Смесь, модифицированная В II, – MF TU BY 690610504.001–2012  |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,2                                                          | 2,3 | 2,6 | 3,4 | 4,7 | 6,1 |
|                                              | Смесь, модифицированная ММД2П                                |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,2                                                          | 2,1 | 2,9 | 3,9 | 5,2 | 6,4 |
|                                              | Смесь, модифицированная смесью полиэтиленов                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,7                                                          | 2,7 | 2,8 | 3,3 | 4,2 | 5,5 |
|                                              | Смесь, модифицированная СБС                                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,0                                                          | 2,1 | 2,4 | 3,7 | 5,0 | 6,3 |
|                                              | Смесь, модифицированная СБР                                  |     |     |     |     |     |
|                                              | 2,1                                                          | 1,9 | 2,0 | 3,9 | 5,2 | 6,7 |

При этом наблюдаем, что расхождение значений показателя водонасыщения контрольного образца и асфальтобетона типа А, пригото-

ленного на битуме, модифицированном смесью полиэтиленов, значительно выше (рис. 5). Это объясняется тем, что в менее каркасных смесях жесткость вяжущего может играть более ощутимую роль из-за того, что в соотношении матрица/каркас матрица начинает преобладать. Такая же картина наблюдается и на образцах типа Б (рис. 6), что подтверждает предположение.

Таблица 8

**Результаты испытаний модифицированных  
щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа Б**  
**Test results of modified crushed stone  
fine-grained asphalt concrete of type B**

| Вид<br>испытания                                        | Температура определения показателя<br>водонасыщения образца, °С |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                         | 10                                                              | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  |
| Значение<br>показателя<br>водонасыще-<br>ния образца, % | Смесь, модифицированная В II, –<br>MF ТУ ВУ 690610504.001–2012  |     |     |     |     |     |
|                                                         | 2,4                                                             | 2,5 | 2,7 | 4,2 | 5,8 | 8,3 |
|                                                         | Смесь, модифицированная ММД2П                                   |     |     |     |     |     |
|                                                         | 2,2                                                             | 2,0 | 2,8 | 4,5 | 6,3 | 7,4 |
|                                                         | Смесь, модифицированная<br>смесью полиэтиленов                  |     |     |     |     |     |
|                                                         | 3,0                                                             | 3,4 | 3,9 | 4,7 | 6,2 | 8,8 |
|                                                         | Смесь, модифицированная СБС                                     |     |     |     |     |     |
|                                                         | 2,4                                                             | 2,8 | 3,3 | 5,4 | 6,7 | 7,5 |
|                                                         | Смесь, модифицированная СБР                                     |     |     |     |     |     |
|                                                         | 2,5                                                             | 2,5 | 2,9 | 4,4 | 6,3 | 8,1 |

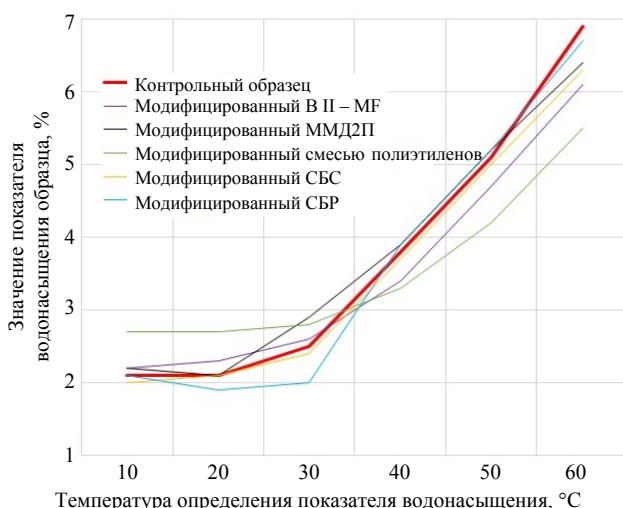


Рис. 5. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа А

Fig. 5. Summary graph of changes in the values of water saturation index of control sample and modified asphalt concrete of A-type

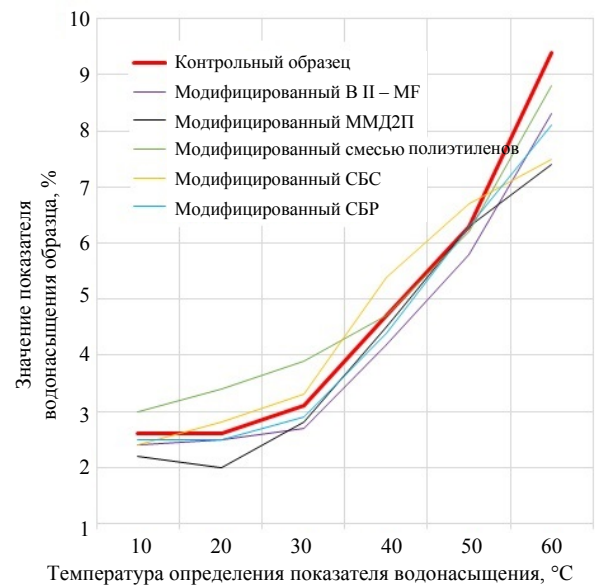


Рис. 6. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа Б

Fig. 6. Summary graph of changes in the values of water saturation index of control sample and modified asphalt concrete of B-type

## ВЫВОДЫ

1. При анализе результатов измерения водонасыщения различных типов асфальтобетонов видно, что с ростом температуры на бескаркасных смесях (типы А и Б) относительная разница значений, получаемых при нормальных условиях испытаний и при высоких температурах, становится меньше, чем на каркасных асфальтобетонах. Это объясняется не разницей в количестве каменного материала, а толщиной битумной пленки на его поверхности. Так, в работе [10] показано, что процент когезионного расслоения значительно увеличивается с ростом толщины пленки битума и может достигать 65 % когезионного отслоения, рассчитанного как отношение площадей оставшихся молекул битума к общей поверхности раздела битум – каменный материал.

2. Так как отрыв происходит в слое вяжущего, можно говорить о том, что в многослойных асфальтобетонах, характеризующихся большим количеством мастики в своем составе и высокой степенью ее структуризации, при условии разряжения и высоких температур вода проникает не только под битумную пленку, но и в когезионный разрыв. При этом модифи-

цированный битум эффективнее противостоит когезионному разрыву за счет сформированной полимерами подсистемы, что наглядно демонстрирует проведенное исследование.

3. В случае, когда полимер благодаря родству с битумом химически с ним соединяется, этот эффект усиливается, что также подтверждается исследованиями [6], направленными на определение показателей межфазной энергии, коэффициента диффузии и относительной концентрации СБС-модифицированного битума методом моделирования молекулярной динамики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
2. Analysis of the Cohesion/Adhesion Proportion around Bitumen-Mineral Failure Interface under Tensile Loading / B. Shi [et. al.] // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 399. Art. 132555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132555>.
3. Characterisation of Temperature and Loading Rate Dependent Bond Strength on the Bitumen-Aggregate Interface using Direct Shear Test / M. Dong [et. al.] // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 394. Art. 132284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132284>.
4. Investigation of the Relationship between Fluidity and Adhesion Strength of Unmodified and Modified Bitumens using the Pull-Off Test Method / H. Ali Omar [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.053>
5. Borges Miranda H.M. The Influence of Recycled Plastics Added via the Dry Process on the Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures / H. M. Borges Miranda, D. Domingues, M. J. Rato // *Transportation Engineering*. 2023. Vol. 13. Art. 100197. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100197>.
6. Yao X. Interfacial Adhesive Behaviors between SBS Modified Bitumen and Aggregate using Molecular Dynamics Simulation / X. Yao, Ch. Li, T. Xu // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 33, Art. 102245. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.102245>.
7. Interpretation of Stripping at the Bitumen-Aggregate Interface based on Fluorescence Tracing Method / Yi Peng [et. al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 7566. P. 5767–5780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.035>.
8. Evaluation of Different Test Methods for Bitumen Adhesion Properties / M. Paliukaitė [et. al.] // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 4592. P. 724–731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>.
9. Основы научных исследований: учеб. для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. М.: Высш. шк., 1989. 400 с.
10. Modeling Percentages of Cohesive and Adhesive Debonding in Bitumen-Aggregate Interfaces using Molecular Dynamics Approaches / P. Chen [et. al.] // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 571. Art. 151318. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151318>.

Поступила 20.05.2024

Подписана в печать 23.07.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

## REFERENCES

1. Verenko V. A., Zankovich V. V., Ladyshev A. V., Lira S. V., Afanasenko A. A., Yatsevich P. P. (2015) *Durable Asphalt Concrete Coatings for Highways, Bridges and Streets*. Minsk, Art Dezayn Publ. 296 (in Russian).
2. Shi B., Liu Q., Gao Y., Wu J., Chen J. (2023) Analysis of the Cohesion/Adhesion Proportion around Bitumen-Mineral Failure Interface under Tensile Loading. *Construction and Building Materials*, 399, 132555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132555>.
3. Dong M., Sun B., Thom N., Li L. (2023) Characterisation of Temperature and Loading Rate Dependent Bond Strength on the Bitumen-Aggregate Interface Using Direct Shear Test. *Construction and Building Materials*, 394, 132284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132284>.
4. Ali Omar H., Md. Yusoff N. I., Ceylan H., Sajuri Z., Jakarni F. M., Ismail A. (2016) Investigation of the Relationship between Fluidity and Adhesion Strength of Unmodified and Modified Bitumens Using the Pull-Off Test Method. *Construction and Building Materials*, 122, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.053>.
5. Borges Miranda H. M., Domingues D., Rato M. J. (2023) The Influence of Recycled Plastics Added via the Dry Process on the Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures. *Transportation Engineering*, 13, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100197>.
6. Yao X., Li Ch., Xu T. (2022) Interfacial Adhesive Behaviors between SBS Modified Bitumen and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation. *Surfaces and Interfaces*, 33, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.102245>.
7. Peng Y., Zhao T., Zeng Q., Deng L., Kong L., Ma T., Zhao Y. (2023) Interpretation of Stripping at the Bitumen-Aggregate Interface Based on Fluorescence Tracing Method. *Journal of Materials Research and Technology*, 7566, 5767–5780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.035>.
8. Paliukaitė M., Vorobjovas V., Bulevičius M., Andrejevas V. (2016) Evaluation of Different Test Methods for Bitumen Adhesion Properties. *Transportation Research Procedia*, 4592, 724–731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>.
9. Krutov V. I., Grushko I. M., Popov V. V., Savel'ev A. Ya., Sumarokov L. N., Venikov V. A., Kogdov N. M., Timofeeva O. V., Chus A. V., Momot A. I. (1989) *Fundamentals of Scientific Research*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
10. Chen P., Luo X., Gao Y., Zhang Y. (2022) Modeling Percentages of Cohesive and Adhesive Debonding in Bitumen-Aggregate Interfaces Using Molecular Dynamics Approaches. *Applied Surface Science*, 571, 151318. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151318>.

Received: 20.05.2024

Accepted: 23.07.2024

Published online: 30.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-417-426>

UDC 629.331.03-83-592.3

## Control Voltage Effect on Operational Characteristics of Vehicle Magnetorheological Damper

Le Van Nghia<sup>1)</sup>, Dam Hoang Phuc<sup>1)</sup>, Tran Trong Dat<sup>1)</sup>, Nguyen Trung Kien<sup>2)</sup>,  
S. V. Kharitonchik<sup>3)</sup>, V. A. Kusyak<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Hanoi University of Science and Technology (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

<sup>2)</sup>Dai Nam University (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

<sup>3)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Abstract.** Considering the increasingly large-scale application of magnetic fluids in various industries, we can confidently state that in the near future magnetorheological dampers will be widely used in adaptive automotive suspensions due to their operational flexibility and simplicity of controlling damping forces by changing the magnetic fluid properties according to parameters of surrounding electromagnetic field. The antivibration efficiency during operation is achieved by regulating the hydraulic resistance of the “magnetic” shock absorber by applying voltage to the windings of its coil. In addition to the physical properties of the oil used in the “magnetic” shock absorber, the viscosity of the working magnetorheological fluid is greatly influenced by the shape of the control signal. The paper focuses on the theoretical aspects of constructing a mathematical model of ac magnetorheological damper and presents the results of a computer experiment to assess effectiveness of its use as part of the adaptive suspension a passenger vehicle. In this case, the actual parameters of the “magnetic” shock absorber, used in modeling the dynamic process, were determined experimentally on a test bench, and the adequacy of the developed mathematical model was confirmed by the results of a semi-natural experiment. Using a verified model, the magnetorheological damper characteristics were obtained and compared for various forms of control signal, including rectangular voltage pulses of various frequencies and duty cycles, sinusoidal pulses and constant voltage signals. The analysis of the antivibration efficiency was carried out on the basis of the developed “quarter” model of a semi-active car suspension with a verified submo-del of a magnetorheological damper integrated into its structure. Moreover, the simulation scenarios were based on the selected strategy for controlling the voltage supplied to the windings of the “magnetic” shock absorber. As the results of theoretical and experimental studies have shown in terms of energy consumption, expansion of the working area of the damping characteristic and achieving smooth control of the damping force, the most effective is the use of a sinusoidal pulse voltage signal in the control circuit, which ensures a reduction in both the amplitude and damping time of oscillations. However, when de-signing and manufacturing a controller, creating a pulse modulator for generating sinusoidal pulses coinciding in phase and frequency with the vibrations of the car body is very difficult due to the random nature of external disturbances from the road surface. When a constant voltage is applied to the magnetorheological damper winding, the damping properties of the suspension are also improved compared to the basic design based on a traditional hydraulic shock absorber. Moreover, there is a proportional relationship between the voltage supplying the damper, the amplitude and damping time of the vibrations of the car body is observed. An increase in the control signal voltage from 1 to 2 V leads, in comparison with passive control of a magnetic shock absorber, to a decrease in the maximum amplitude of vibrations of the car body by 6.25 and 11.25 %, respectively, and a decrease in the vibration damping time by 0.72 and 1.41 s.

**Keywords:** active automotive suspension, magnetorheological damper,  $\frac{1}{4}$  car suspension model; Dahl model, control voltage signals, semi-natural experiment, magnetorheological damper testing, simulation, damping characteristics

**For citation:** Nghia Le Van, Phuc Dam Hoang, Dat Tran Trong, Kien Nguyen Trung, Kharytonchyk S. V. , Kusyak V. A. (2024) Control Voltage Effect on Operational Characteristics of Vehicle Magnetorheological Damper. *Science and Technique*. 23 (5), 416–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-416-425>

### Адрес для переписки

Дам Хоанг Пхук  
Ханойский университет науки и технологий  
ул. Дай Ко Вьет, 1,  
100000, г. Ханой, Вьетнам  
Тел.: +84 932367577  
[Hoan.nguyentrong@hust.edu.vn](mailto:Hoan.nguyentrong@hust.edu.vn)

### Address for correspondence

Dam Hoang Phuc  
Hanoi University of Science and Technology  
1, Dai Co Viet Street,  
100000, Ha Noi, Viet Nam  
Tel.: +84 932367577  
[Hoan.nguyentrong@hust.edu.vn](mailto:Hoan.nguyentrong@hust.edu.vn)

## Влияние управляющего напряжения на эксплуатационные характеристики магнитореологического демпфера автомобиля

Ле Ван Нгиа<sup>1)</sup>, Дам Хоанг Пхук<sup>1)</sup>, Чан Чонг Дат<sup>1)</sup>, Нгуен Чунг Кьен<sup>2)</sup>,  
С. В. Харитончик<sup>3)</sup>, В. А. Кусяк<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Ханойский университет науки и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

<sup>2)</sup>Дай Нам университет (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

<sup>3)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Учитывая все более масштабное применение магнитных жидкостей в различных отраслях промышленности, можно с уверенностью констатировать, что в ближайшем будущем магнитореологические демпферы будут широко использоваться в автомобильных подвесках адаптивного класса ввиду их эксплуатационной универсальности и несложного алгоритма управления энергией рассеивания при изменении свойств магнитной жидкости в зависимости от параметров электромагнитного поля. Эффективность гашения колебаний в процессе движения достигается за счет регулирования гидравлического сопротивления «магнитного» амортизатора посредством подачи напряжения на обмотки его катушки. Помимо физических свойств используемого в «магнитном» амортизаторе масла, на вязкость рабочей магнитореологической жидкости большое влияние оказывает форма управляющего сигнала. В статье рассматриваются теоретические аспекты построения математической модели магнитореологического демпфера и приводятся результаты компьютерного эксперимента по оценке эффективности его использования в составе адаптивной подвески легкового автомобиля. При этом фактические параметры «магнитного» амортизатора, используемые при моделировании динамического процесса, определялись экспериментально на испытательном стенде, а адекватность разработанной математической модели подтверждена результатами полунатурного эксперимента. С помощью верифицированной модели получены и сопоставлены характеристики магнитореологических демпферов при различных формах управляющего сигнала, включая прямоугольные импульсы напряжения различной частоты и коэффициента заполнения, синусоидальные импульсы и сигналы постоянного напряжения. Анализ эффективности гашения колебаний проводился на базе разработанной «четвертной» модели полуактивной подвески автомобиля с интегрированной в ее структуру верифицированной субмоделью магнитореологического демпфера. При этом сценарии моделирования основывались на выбранной стратегии управления напряжением, подаваемым на обмотки «магнитного» амортизатора. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований с точек зрения энергопотребления, расширения рабочей области демпфирующей характеристики и достижения плавности управления демпфирующей силой, наиболее эффективным является использование в цепи управления синусоидального импульсного сигнала напряжения, обеспечивающего уменьшение как амплитуды, так и времени гашения колебаний. Однако при проектировании и изготовлении контроллера создание импульсного модулятора, генерирующего синусоидальные импульсы, совпадающие по фазе и частоте с колебаниями кузова автомобиля, весьма затруднительно ввиду случайного характера внешних возмущений от дорожного покрытия. При подаче на обмотку магнитореологического демпфера сигнала постоянного напряжения демпфирующие свойства подвески также улучшаются по сравнению с базовой конструкцией на основе традиционного гидравлического амортизатора. Причем прослеживается пропорциональная зависимость между вольтажом питающего демпфер напряжения, амплитудой и временем затухания колебаний кузова автомобиля. Увеличение напряжения управляющего сигнала с 1 до 2 В приводит по сравнению с пассивным управлением магнитным амортизатором к снижению максимальной амплитуды колебаний кузова автомобиля соответственно на 6,25 и 11,25 % и уменьшению времени гашения колебаний на 0,72 и 1,41 с.

**Ключевые слова:** активная подвеска автомобиля, магнитореологический демпфер; модель 1/4 подвески автомобиля; модель Дала, сигналы управляющего напряжения, полунатурный эксперимент, испытание магнитореологического демпфера, имитационное моделирование, характеристики демпфирования

**Для цитирования:** Влияние управляющего напряжения на эксплуатационные характеристики магнитореологического демпфера автомобиля / Ле Ван Нгиа [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 417–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-417-426>

### Introduction

Due to the unique properties of magnetorheological (MR) fluids the last one has been used in a wide variety of applications such as rotary brakes, forging equipment, clutches, polishing and grinding equipment [1–6]. Among them, MR liquid dampers are semi-active control devices that

are widely used in today's industrial applications. Magnetic rheological damper (MRD) is one of the semi-active devices that promises to be commonly used in automotive engineering. The main feature of MRD is magnetic rheological oil, whose specific properties can be changed by applying a magnetic field, which in turn can lead to inducing force variation in the damping [7, 8].

To study the model of the MR damper, several methods have been proposed over the years to obtain MR damper models and determine their parameters. Spencer and colleagues [9] developed a phenomenological model that accurately describes the response of MR dampers to cyclic stimuli. This is a modified Bouc–Wen (BW) model adjusted by ordinary differential equations. The models based on the BW in semi-active seismic vibration control have proven to be easy in usage and have an acceptable quantity. Using a different approach from Spencer's, Kyle et al modeled an MR damper as a Takagi–Sugeno–Kang fuzzy inference system [10]. The model's training and test data were generated using Spencer's MR damper model.

In a study at Sakarya University, experimental and theoretical analysis was performed to predict the behavior of a linear rheological magnetic damper. A rheological magnetic damper was designed and built for dynamic testing on a mechanical cage that sinusoidal stimulus. The same flow analysis was performed on the prototype MR damper based on the Bingham model, and a parametric algebraic model was analyzed to test the hysteresis behavior of the MR damper. The final observation was that the algebraic model succeeded at the highest excitation velocity of 0.2 m/s [11].

Other authors have studied the response of the MR damper, emphasizing the difference between the pre-elastic and the posterior viscous volumes as an essential aspect of the damper. The study by Spencer, Butz, and Stryk showed that the difference between using the modified BW model and the Bingham-plastic model in a 2-degree-of-freedom automotive dynamic system was minimal [12].

In 2003, John Gravatt conducted a performance test of the suspension combined with the MR shock absorber on a sports motorcycle. The obtained results showed the criterion of reducing suspension displacement, stability time, and oscillation of the suspension system when equipped with MR dampers, thereby improving the efficiency in reducing instability [13].

Due to their enormous force control ability, magnetic rheological dampers have been used to avoid seismic effects caused by earthquakes on civil works. In an experiment, the dynamic power of the damper checked by a dynamic excitation test was compared with two types of rheological fluids. Two types of rheological fluids are 132LD, manufac-

ured by Lord Corporation, and experimental product #104, manufactured by Bando Chemical Industries on a trial basis [14].

Like the above experiment, an MR liquid sample was developed using OKS1050 silicone oil and mixed with carbonyl powder. Furthermore, to reduce deposition, Aerosi200 was added as a stabilizer, and the finite element method modeled the magnetic field acting on the rheological liquid. Then the model was analyzed by ANSYS software, and the results showed that the model completely satisfied the dynamic characteristics of the mechanical system [10].

Kyle and Roschke used a fuzzy logic-based model with three inputs: displacement, voltage, and velocity, which were modeled on the data generated by the simulation. From the experimentally measured data, it can be seen that the hysteresis loop is independent of the steady field. Therefore, the BW model parameters are considered independent of the current [15].

According to the research [16], the controlled damping force was generated depending on the control current. In addition, MR fluid shock absorbers were operated with high reliability, and their functions were virtually uninterrupted by temperature fluctuations or any impurities in the fluid. However, the significant disadvantage hindering the MR fluid damper was its non-linear properties concerning force versus displacement and hysteresis force versus velocity. Therefore, making an MR fluid damper with maximum efficiency is a big challenge, especially when it comes to making an accurate model to take full advantage of this particular device. Another is to design the most efficient algorithm to improve the system's performance.

The MRD characteristic is a function of the voltage or current flowing into the solenoid coil. In addition, this characteristic is highly dependent on the input voltage or current characteristics. Thanks to this relationship, the drag coefficient of the MR dampers can be easily controlled in real-time. Therefore, the study of MR damping is necessary, which requires studies in building MR damping models.

This article presents a study on the influence of voltage-controlled signals on the characteristics of MR dampers, thereby providing a basis for developing control algorithms for car's active suspension systems. A simulation method combined with experiments is chosen to conduct the research.

Specifically, an MR damper model is constructed and validated through experiments on a test bench. This model is then used to develop a quarter-car suspension system model, analyzing the effectiveness of MR dampers when the vehicle encounters road irregularities.

### System design and results

**Suspension model combined with MR shock absorber.** The MR damper has a non-linear characteristic curve, which makes it difficult to describe its behavior. The proposed models must be accurate, that is, the output of the predictive model and the experimental data must be the same. The model must also be simple to allow an easy parameter identification, and the controls are less complex and ultimately reversible, meaning that different inputs and outputs can be selected and changed position.

In 1968 the magnetic field damping model was independently proposed by Dahl to describe friction behavior and developed by Bouc (1971) to represent hysteresis phenomena. Dahl's viscous model used in this study is based on the model proposed by Aguirre [17]. The diagram of Dahl's viscous model is shown in Fig. 1.

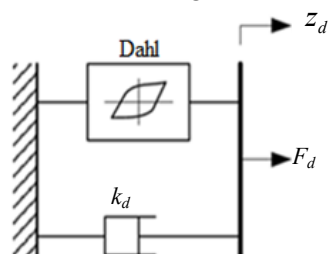


Fig. 1. Dahl model diagram

Dahl's MR damping model, described by equations (1) and (2), considers semi-static links in the origin of friction. The damping force  $F_d$  is a function of the instantaneous damper piston velocity  $\dot{z}_d$ . In addition, the damping force  $F_d$  is also affected by the hysteresis loop shape parameters  $k_d$ ,  $k_{wa}$ ,  $k_{wb}$ ,  $\rho$  and the dynamic hysteresis coefficient  $w$ , describing the nonlinear damping behaviour:

$$F_d = k_d \dot{z}_d + (k_{wa} + k_{wb} u) w; \quad (1)$$

$$\dot{w} = \rho (\dot{z}_d - |\dot{z}_d| w), \quad (2)$$

where  $u$  – MRD coil control voltage, V.

From equation (2), it can be shown that increasing the voltage  $u$  or  $k_{wb}$  will have the same

effect on the shape. Increasing either of them will result in an increase in the value in the hysteresis loop. Reducing  $\rho$  will change the width of the hysteresis ring, producing a rapid change in force. The hysteresis parameters, used in the Dahl's viscous model are the following:  $u = 0.3$  V,  $k_d = 5$ ,  $k_{wa} = 80$ ,  $k_{wb} = 80$ ,  $\rho = 10$ .

Car's  $1/4$  suspension model combined with MR shock absorber is shown on Fig. 2, where the passive damping element is replaced by MR damper and the damping coefficient  $c_s$  is no longer shown. The right part is the MR shock absorber; the left one is the passive  $1/4$  suspension model. The input of the  $1/4$  suspension model is the road surface vibration  $z_r$  (the study uses the 5 cm square pulse-shaped pavement impact) and the magnetic damping force  $F_d$  of MR shock absorber. The output of the model is the vehicle body displacement  $z_b$ , the wheel displacement  $z_w$ , and the oscillation body velocity  $\dot{z}_d$ , which is the input of the MR damping model. As a result, the suspension system has only two parameters,  $k$  and  $F_d$  ( $F_d$ : MR damping force calculated using the Dahl model).

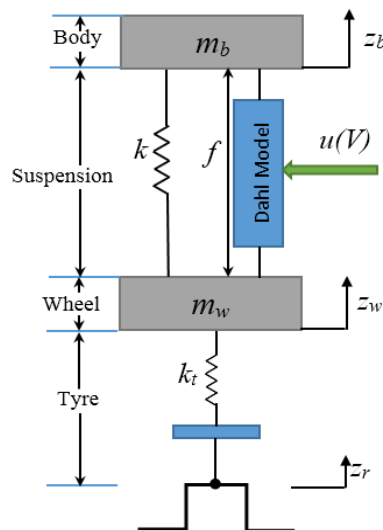


Fig. 2. Car's  $1/4$  suspension model with MR damper  $k$ ,  $k_t$  – stiffness of the spring element and tire,  $k = 12500$  N/m,  $k_t = 76000$  N/m;  $m_b$ ,  $m_w$  – vehicle body and wheel weights,  $m_b = 342$  kg,  $m_w = 38$  kg;  $F_d$  – MRD damping force, N

Equation (1) combined with MR damping gives the following equation:

$$\begin{cases} m_b \ddot{z}_b = -k(z_b - z_w) + F_d; \\ m_w \ddot{z}_w = k(z_b - z_w) - k_t(z_w - z_r) - F_d, \end{cases} \quad (3)$$

where  $\ddot{z}_b$ ,  $\ddot{z}_w$  – accelerations of the sprung and unsprung masses.

**Experimental determination of Dahl model parameters and experimental results.** For experimental determination of damping characteristics a special test bench (Fig. 3) was manufactured at Department of Automotive Engineering group of Hanoi University of Science and Technology.

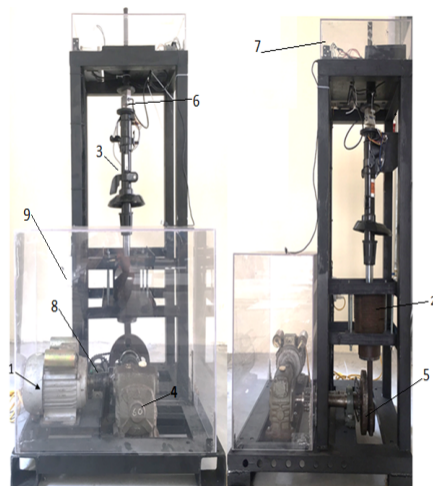


Fig. 3. Test equipment for damping characteristics  
1 – Motor; 2 – Cylinder-piston; 3 – MR damper; 4 – Gearbox;  
5 – Eccentric disc; 6 – Force sensor (load cell);  
7 – Control box; 8 – Pulse encoder; 9 – Power switch

Test equipment includes BWI front suspension MR damper 3 (see Fig. 3) of Acurra 2011 cars, which has the following characteristics:

- Dimensions,  $L \times D \times d$ : 760×287×259 mm.
- Weight: 3,1 kg.
- The change in damping force with the expression variations from 0 to 1 V: about 800 N.
- Inner solenoid coil resistance of damper measured: 1  $\Omega$  at 29 °C.

In this study, damping characteristics were measured at low voltage supply states. The test scenario involves measuring the force acting on the piston, piston rod displacement/velocity and the encoder pulse when the control voltage changes from 0 to 1 V with an average step of 0.2 V [18].

The comparison of MR damping properties between simulation and experiment through qualitative geometry is shown in Fig. 4. The graph shows damping characteristics based on the relationship between the force-velocity and the force-displacement of the piston under the action of a voltage of 0.1 V.

According to the graph, regarding the profile of the force-displacement relationship, the damping force is symmetrical about the axis. Do the same

for different supply voltages to the damper, thereby building a relationship between the hysteresis parameter values on the Dahl model and the control voltage.

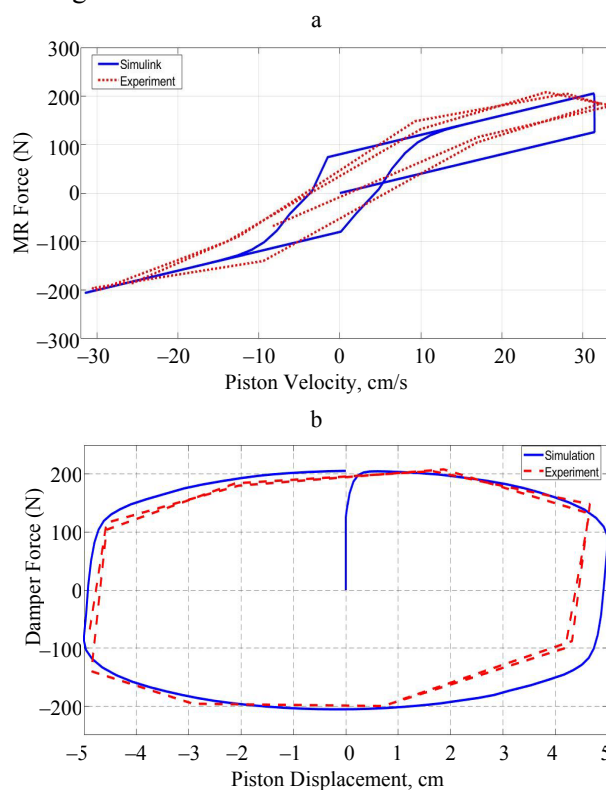


Fig. 4. Simulation and experiment damping characteristics when applying voltage 0.1 V:  
a – Force-velocity characteristic of MR damping;  
b – Force-displacement characteristic of MR damping

Qualitatively, the characteristics of the damping force according to the simulation are close to the characteristic curve when experimenting, which shows that the parameters used in the simulation are very close to the actual conditions. These parameters were evaluated and determined through the correlation function to find the ratio between simulation and experiment by determining the force at the same displacement position on the graph. The summary and evaluation of the correlation between simulation according to the Dahl model and MR Acurra 2011 damping experiment is shown in Table 1.

Thus, the correlation coefficient between the simulation and experiment is close to 1, which can be concluded that the parameters used in the simulation are relatively consistent with the actual experimental determination of MR damping characteristics using the 2011 Acurra front suspension.

This parameter will be used to simulate the characteristics of the MR dampers under the influence of different voltages.

Table 1

Correlation between simulation and experiment

| Voltage (V) | Correlation between simulation and experiment |
|-------------|-----------------------------------------------|
| 0           | 0,9831                                        |
| 0.1         | 0,9693                                        |
| 0.3         | 0,9782                                        |
| 0.5         | 0.9841                                        |
| 0.8         | 0.9263                                        |
| 1.0         | 0.9657                                        |

**Simulation of MR damping performance.** To study the influence of control signal form on the characteristics of MR dampers, the paper uses the Dahl's model with different control voltage signals, schematically depicted in Fig. 5.

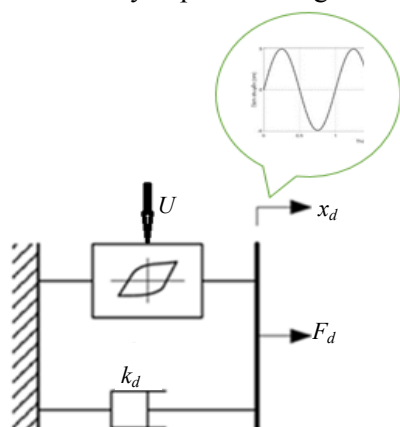


Fig. 5. Schematic simulation of the voltage effect on MRD damping characteristics

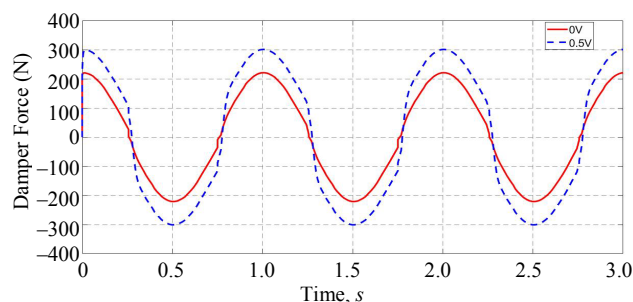
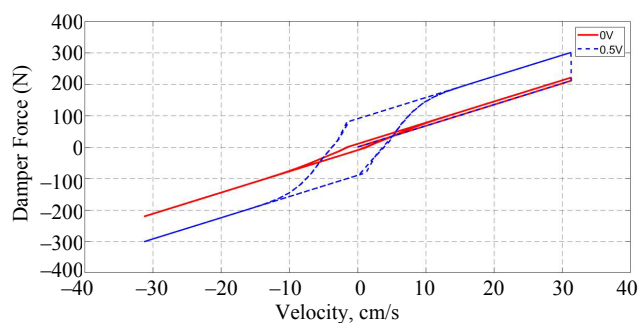
In this diagram, the  $x_d$  displacement signal is a sine wave with the amplitude of 5 cm and the frequency of 1 Hz. The control input voltage signal for the MR damper is the voltage signal  $U$ . This voltage varies according to the preselected characteristics and is shown in Table 2 [19].

Table 2

MR. damping characteristic simulation scenario

| Alternative | Control Voltage                                                                   | Characteristic                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1           | Constant voltage level 0 and 0.5 V                                                | Force-time ( $F_d - t$ )             |
| 2           | Sine and square pulse voltage supply, positive side, 0.5 V amplitude              | Force-displacement ( $F_d - z_d$ )   |
| 3           | Sine and square pulse voltage supply, negative-positive symmetry, 0.5 V amplitude | Force-velocity ( $F_d - \dot{z}_d$ ) |

In case of constant voltage supply 0 and 0.5 V to the MR damper (see Table 2, alternative 1) the simulation results of the damping characteristics are shown in Fig. 6 and 7. The graphs show the time history of MR damping force characteristics, according to velocity and piston displacement.

Fig. 6.  $F_d - t$  characteristic at a constant control voltageFig. 7.  $F_d - \dot{z}_d$  characteristic at a constant control voltage

According to Fig. 6, when the constant voltage is applied to the shock absorber, the damping force has the same profile as the velocity (faster than the displacement  $z_d$  by  $\pi/2$ ). This shows that MR dampers' characteristics are similar to those of passive dampers ( $F_d \cdot \dot{z}_d > 0$ ). However, the value of the damping force is proportional to the input voltage; the profile is also steeper when increasing the control voltage ( $F_d - t$  graph), showing a very immediate effect on the damping when the voltage is present. In Fig. 7 ( $F_d - \dot{z}_d$  graph), in the state without controlling voltage, the damping characteristic is almost the same as that of the passive damping type (the characteristic curve is quite linear); however, when the controlling voltage is applied, in the input control, the damping force varies significantly for the low-speed, while in the high-speed, the damping force has a linear characteristic. This shows that with a constant control voltage, the damping force with velocity ( $F_d - \dot{z}_d$ ) characteristic divides into two zones:

– low-speed zone: the area with high hysteresis; the applied force significantly differs between the compression and return strokes;

– high-velocity zone: the force characteristics have almost no hysteresis; the force value increases linearly with the speed and damper input voltage.

In case of positive side voltage pulse supply to the MR damper (see Table 2, alternative 2) – the simulation results of the damping characteristics under two pulse types “sine” and “square” are shown in Fig. 8 and 9 through 2 graphs:  $F_d - t$  and  $F_d - \dot{z}_d$ .

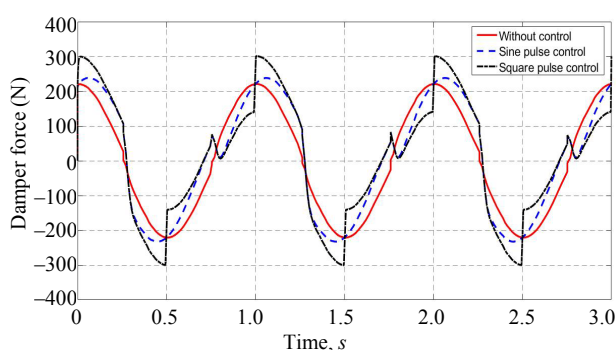


Fig 8.  $F_d - t$  characteristic at positive side control voltage

On the graph ( $F_d - t$ ) (Fig. 8), the oscillation phase of the force is still in phase with the piston speed, but the force amplitude is small and the damping force characteristics between the two control pulses are very close together. At some point on the force curve when driven by a “square” pulse, the damping force has a characteristic step-wise step over the pulse duration (in locations where the control voltage is sudden, the force spikes sudden), this will affect the smoothness of the body. After a short time, this force characteristic coincides with the force characteristic of the “sine” impulse control pulse. This shows that the sine control signal will give better controllability and energy saving than the square pulse signal.

The force versus velocity characteristics is shown in Fig. 9. The graph ( $F_d - \dot{z}_d$ ) shows that the hysteresis area of the damping force is extended to include the high-velocity zone, overcoming the disadvantage compared to the control in the form of constant voltage. The hysteresis area of the damping force in two different compression and return states is more comprehensive when the damping is in the compressed state. It shows that

the shock absorber has a wider working area in the compression state with this control pulse.

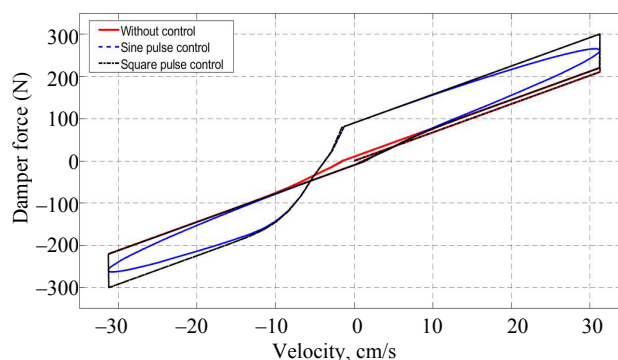


Fig. 9.  $F_d - \dot{z}_d$  characteristic at positive side control voltage

In case of positive-negative symmetrical voltage pulse supply to the MR damper (see table 2, alternative 3) the simulation results of the damping characteristics are shown in Fig. 10 and 11.

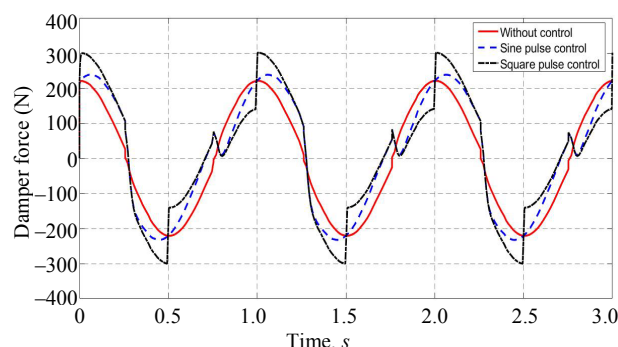


Fig. 10.  $F_d - t$  characteristic at positive-negative symmetrical control voltage

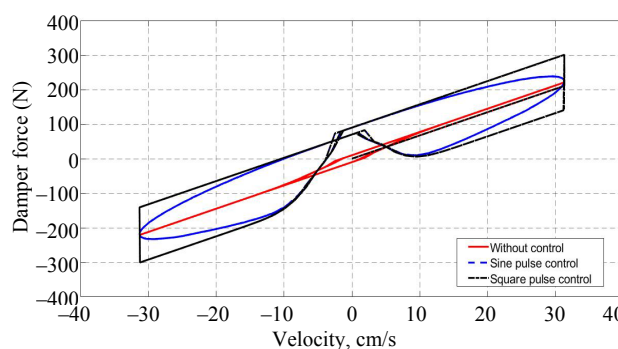


Fig. 11.  $F_d - \dot{z}_d$  characteristic at positive-negative symmetrical control voltage

The amplitude of the maximum force is reduced in the case of “sine” pulses and unchanged in the “square” case, besides, the force profiles in the two cases appear with many jumping points. For “square” pulses are points where the supply

voltage direction changes, while “sine” pulses are points with extremes on the “negative” side, the force characteristics ( $F_d - t$ ) when driven by a “square” pulse for the jump larger than the “sine” pulse.

On the ( $F_d - \dot{z}_d$ ) graph, the hysteresis zone of the force is also enlarged, as in the case of positive flank impulse supply.

**Comment:** The damping force characteristics are various with different types of control voltages. With a constant control voltage, the force drop is symmetrical both in the compression and the release strokes and have a smooth curved characteristic, the slope of which changes with the input voltage. In the two cases of the pulse voltage supply, it was found that the damping is more effective in the compression stroke, which allows the control voltage characteristic to be developed when designing the control for this type of damping, thereby helping to extend its operational tuning range relative to an initially specified control characteristic.

In this simulation range, the impulse control voltage signal is fed according to the piston oscillation frequency, so according to the results in Fig. 8 and 9, the positive side “sine” pulse level is the best based on the damping force and power characteristics for control. Because, with this type of control pulse, the curvilinear force characteristic is smooth, without a jump, the damping hysteresis zone is widened to the high-velocity region. In addition, according to the power supply criterion, this type of control is energy saving one because the average voltage is lower than in case of the control with constant voltage.

However, when designing and manufacturing a controller, a pulse modulator controlled by a “sine” pulse coinciding with vehicle body oscillations (phase and frequency) will be difficult when the pavement excitations are random and unpredictable. That will increase the cost of the control system, therefore, the study selects the damping control voltage as constant over time.

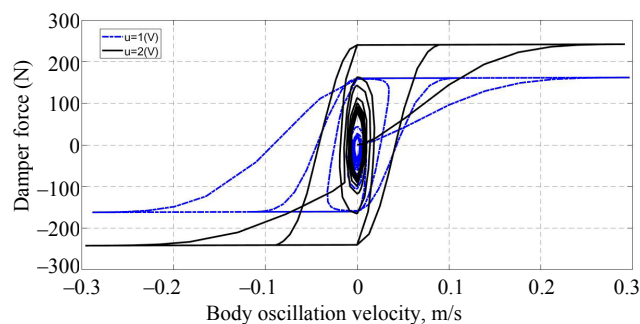
**Simulation of suspension system with MR damper.** In the scope of the research, the paper uses the 5 cm square pulse-shaped pavement impact (see Fig. 2) to examine the response of the suspension system to the vibration of the vehicle body under the effect of different MR shock

absorber input voltage values. The study uses the Dahl model coupled with the a quarter car suspension model to evaluate the effectiveness of MR shock absorbers arranged in the suspension system. The evaluation criterions are the maximum vibration amplitude of the vehicle body and the oscillations quenching time [20]. The simulation strategy is shown in Table 3, the simulation results are presented in Fig. 12 and 13.

Table 3

Simulation scheme of operation suspension system with MR damper

| Alternative | Input                                    | Voltage (V) | Evaluation criteria                                                |
|-------------|------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1           | Square pulsating road surface undulation | 0           | Amplitude, body oscillation frequency, oscillations quenching time |
| 2           |                                          | 1           |                                                                    |
| 3           |                                          | 2           |                                                                    |

Fig. 12.  $F_d - \dot{z}_d$  characteristics on suspension with MR dampers

According to the  $F_d - \dot{z}_d$  graph, the damping force also increases when the damper input voltage increases. The damping force increases depending on the piston rod's speed and the voltage applied to the damper. The higher the voltage is, the smaller the oscillation amplitude of the vehicle body and the smaller the oscillation time becomes.

The results of body oscillation are shown in Fig. 13. The effect of suppressing the vibrations of the vehicle's body when there is a control current in the dampers is much higher than when there is no control.

The maximum amplitude of oscillation of the vehicle body when the voltage level is larger, the greater the amplitude and damping time reductions. Specifically, in comparison with the passive damper, when the voltage control level is 1 and 2 V, the reduction of maximum amplitude is 6.25 and 11.25 %, and the damping time reduction

is 0.72 and 1.41 s respectively. With a small control voltage, the amplitude of the oscillation is reduced, but the oscillation time is still ample. The more the control current, the higher the ability to extinguish the oscillation, both in amplitude and time. It shows the vibration-suppressing efficiency of the MR dampers in the car's 1/4 suspension model.

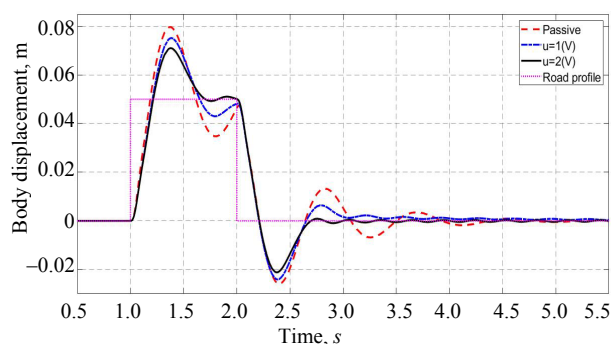


Fig. 13. Body displacement comparison

When no current is applied to the shock absorber, the damping force is not zero. The MR shock absorber acts as a passive shock absorber because the viscosity of the liquid is also the cause of the damping effect when the damping is in the off state.

## CONCLUSION

The study presented the magnetorheological damper model for determining the characteristics of MR dampers. The damper test bend was built to measure the force-velocity and the force-displacement characteristics of the vehicle damper piston and to verify the accuracy of the proposed model. The correlation between the simulation result and experiment data is greater than 0.92, which shows a high level of proposed model reliability. This verified model was used to develop the 1/4 semiactive suspension car model for evaluation of the vibration efficiency.

The study investigated the characteristics of MR dampers under the effect of different control signals, and the simulation results showed that the MR damping control achieved the most optimal efficiency using a “sine” control signal. The positive side has a control frequency that coincides with the characteristics of the input oscillation. However, it is challenging to design a control pulse

generator in the form of a sine pulse whose frequency coincides with the oscillation frequency of the vehicle body. Therefore, in the study, the control signal type is selected as a constant voltage form because it ensures both the working efficiency of the dampers and the simplicity of the control circuit design.

In addition, the study also focuses on simulating the integrated model of a quarter car suspension system with MR dampers, simulating and investigating the efficiency of vibration suppression controlled by the constant voltage. Specifically, a quarter car has MR dampers with 1 and 2 V control voltage. The evaluation of the vibration suppression efficiency through comparison of body displacement shows the effectiveness of MR dampers in suppressing vibrations of the suspension system. As the voltage level increases, the maximum amplitude of the vehicle body's oscillation becomes greater, leading to a reduction in both amplitude and damping time. Specifically, in comparison with the passive damper, when the voltage control level is 1 and 2 V, the reduction of maximum amplitude is 6.25 and 11.25 %, and the damping time reduction is 0.72 and 1.41 s respectively.

From the above results, the user can control the damping force of the MR damper by varying the input supply voltage or current to the magnetic coil. It is necessary for algorithm research and developing semi-active suspension control with MR dampers.

**Funding:** This research is funded by the Hanoi University of Science and Technology under project number T2023-PC-023.

## REFERENCES

1. Hoang Quang Tuan, Trinh Minh Hoang (2023) Simulation-Based Investigation of the Effects of Major Parameters on Magnetorheological Brake Torque. *Journal of Southwest Jiaotong University* 58 (3), 244–251. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.58.3.21>.
2. Hoang Q. T., Trinh M. H., Nguyen N. A., Tran T. T. Determination of Magnetorheological Brake Characteristics by Experiment on the Test Rig. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2022)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31824-5\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31824-5_47).

3. Song W.-L., Li D.-H., Tao Y., Wang N., Xiu S.-C. (2017) Simulation and Experimentation of a Magnetorheological Brake with Adjustable Gap. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28 (12), 1614–1626. <https://doi.org/10.1177/1045389X16679022>.
4. Agyeman P. K., Tan G., Alex F. J., Peng D., Valiev J., Tang J. (2021) The Study on Thermal Management of Magnetorheological Fluid Retarder with Thermoelectric Cooling Module. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101686. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101686>.
5. Bashtovoi V., Reks A., Motsar A. (2017) Energy Dissipation in A Finite Volume of Magnetic Fluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 431, 245–248. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.025>.
6. Bashtovoi V., Reks A., Motsar A., Vikulenkov A. V., Klishev O. P., Markachev N. A., Sel'kov D. A., Tikhonov V. A., Uspenskii E. S. (2014) *Magnetic Fluid Dynamic Vibration Damper*. Patent BY 18250 (in Russian).
7. Lord Corporation Engineering note (1999) *Designing with MR Fluids*. Lord Corporation Engineering note, Thomas Lord Research Center, Cary, NC, December 1999.
8. Yuan X., Tian T., Ling H., Qiu T., He H. (2019) A Review on Structural Development of Magnetorheological Fluid Damper. *Shock and Vibration*, 2019, 1498962. <https://doi.org/10.1155/2019/1498962>.
9. Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K., Carlson J. D. (1997) Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123 (3), 230–238. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1997)123:3(230)).
10. Schurter K. C., Roschke P.N. (2000) Fuzzy Modelling of a Magnetorheological Damper Using ANFIS. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. San Antonio, Texas, USA, 122–127. <https://doi.org/10.1109/fuzzy.2000.838645>.
11. Butz T., von Stryk O. (1999) *Modelling and Simulation of Rheological Fluid Devices*. Preprint SFB-438-9911. Technische Universität München, Germany.
12. Şahin İ., Engin T., Çeşmeci Ş. (2010). Comparison of Some Existing Parametric Models for Magnetorheological Fluid Dampers. *Smart Materials and Structures*, 19 (3), 035012. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/3/035012>.
13. Fujitani H., Sakae H., Kawasak, R., Fujii H., Hiwatashi T., Saito T. (2008). Verification of Real-Time Hybrid Tests of Response Control of Base Isolation System by MR Damper Comparing Shaking Table Tests. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, 6932, 264–272. <https://doi.org/10.1117/12.791079>.
14. Kciuk M., Kurc A., Szewczenko J. (2010). Structure and Corrosion Resistance of Aluminium AlMg<sub>2</sub>. 5; AlMg<sub>5</sub>Mn and AlZn5Mg1 alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 41 (1/2), 74–81.
15. Coulter J. P., Weiss K. D., Carlson J. D. (1993) Engineering Applications of Electrorheological Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4 (2), 248–259. <https://doi.org/10.1177/1045389x9300400215>.
16. Eshkabilov S. L. (2017) Modeling and Simulation of Non-Linear and Hysteresis Behavior of Magneto-Rheological Dampers in the Example of Quarter-Car Model. *International Journal of Theoretical and Applied Mathematics*, 2 (2), 170–189. <https://doi.org/10.11648/j.ijtam.20160202.32>.
17. Aguirre Carvajal N., Ikhouane F., Rodellar Benedé J., Wagg D., Neild S. (2010) Viscous + Dahl Model for MR Dmper Characterization: A Real-Time Hybrid Test (RTHT) Validation. *14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering 2010*. Ohrid, Republic of Macedonia, 30 August-3 September 2010. Available at: [https://eprints.whiterose.ac.uk/96083/1/14ECEE\\_Naile%20Aguirre\\_1023.pdf](https://eprints.whiterose.ac.uk/96083/1/14ECEE_Naile%20Aguirre_1023.pdf).
18. Agrawal A., Kulkarni P., Vieira S. L., Naganathan N. G. (2001) An Overview of Magneto- and Electro-Rheological Fluids and Their Applications in Fluid Power Systems. *International Journal of Fluid Power*, 2, 5–36. <https://doi.org/10.1080/14399776.2001.10781106>.
19. Rabinow J. (1948) The Magnetic Fluid Clutch. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 67 (2), 1308–1315. <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1948.5059821>.
20. Butz T. (1999) *Parameter Identification in Vehicle Dynamics*. Diploma Thesis, Zentrum Mathematik, Technische Universität München.

Received: 18.06.2024

Accepted: 20.08.2024

Published online: 30.09.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-427-438>

УДК 334.02

## Формирование центров превосходства в России с целью стимулирования промышленного развития

Докт. экон. наук, проф. Е. М. Коростышевская<sup>1)</sup>,  
док. техн. наук, проф. О. В. Стоянова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Цель исследования – на основе использования триединых контекстов обобщить опыт формирования центров превосходства в СССР и РФ за период с 1920 г. по настоящее время. Задачи исследования – идентифицировать ключевые инструменты становления и развития центров превосходства и сравнить результаты их использования с целью выявления направлений совершенствования государственной политики и механизма их усиления с учетом сложившейся экономической ситуации и стратегических перспектив развития страны. Методы исследования – индукция, дедукция, анализ и синтез, наблюдение, сравнение, систематизация, описание, эмпирический, эволюционный, системный и историко-логический подход к анализу тех или иных явлений и процессов. Проведенный анализ показал, что при разработке механизма и выборе инструментов формирования центров превосходства в современной России целесообразно учитывать опыт СССР.

**Ключевые слова:** триединые контексты; центр превосходства; технологический суверенитет; национальная и экономическая безопасность; высокотехнологичные отрасли; системный подход; эволюция науки, техники и технологий; промышленность; механизмы и инструменты стимулирования; конкурентоспособность; технологический суверенитет; долгосрочная научно-техническая и промышленная политика; опережающее инновационное развитие; стратегические перспективы развития страны; Академия наук СССР

**Для цитирования:** Коростышевская, Е. М. Формирование центров превосходства в России с целью стимулирования промышленного развития / Е. М. Коростышевская, О. В. Стоянова // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 427–438.  
<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-427-438>

## Formation of Centers of Excellence in Russia for Stimulating Industrial Development

E. M. Korostyshevskaya<sup>1)</sup>, O. V. Stoianova<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>St. Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation),

<sup>2)</sup>National Research University Higher School of Economics (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Abstract.** The purpose of the study is to summarize the experience of forming Centers of Excellence in the USSR and the Russian Federation for the period from 1920 to the present on the basis of triune contexts. The research objectives are

---

### Адрес для переписки

Коростышевская Елена Михайловна  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Университетская набережная, 7/9,  
199034, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
Тел.: +781 23 28-20-00  
[e.korostyshevskaya@spbu.ru](mailto:e.korostyshevskaya@spbu.ru)

### Address for correspondence

Korostyshevskaya Elena M.  
St. Petersburg State University  
7/9, Universitetskaja naberezhnaja,  
199034, Saint Petersburg, Russian Federation  
Тел.: +781 23 28-20-00  
[e.korostyshevskaya@spbu.ru](mailto:e.korostyshevskaya@spbu.ru)

to identify the key tools for the formation and development of Centers of Excellence and compare the results of their use in order to identify the directions for improving state policy and the mechanism for strengthening them, taking into account the current economic situation and the strategic prospects for the country's development. The following research methods have been applied, namely: induction, deduction, analysis and synthesis, observation, comparison, systematization, description, empirical, evolutionary, systemic and historical-logical approach to the analysis of certain phenomena and processes. The results of the study have revealed the most effective mechanisms and tools for forming and stimulating the development of Centers of Excellence for the period from the 1920s to the present, and the paper also presents their evolution based on the use of triune contexts. The analysis has shown that it is advisable to take into account the experience of the USSR when developing the mechanism and selecting tools for the formation of Centers of Excellence in modern Russia.

**Keywords:** triune contexts; Center of Excellence; technological sovereignty; national and economic security; high-tech industries; system approach; evolution of science, engineering and technology; industry; mechanisms and tools of stimulation; competitiveness; technological sovereignty; long-term scientific, technical and industrial policy; advanced innovative development

**For citation:** Korostyshevskaya E. M., Stoianova O. V. (2024) Formation of Centers of Excellence in Russia for Stimulating Industrial Development. *Science and Technique*. 23 (5), 427–438. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-427-438>

## Введение

На протяжении последних 30 лет стимулирование создания и развития центров превосходства велось фрагментарно, без учета триединых контекстов, а с помощью отдельных инициатив, без единой методологической базы. В то же время существует опыт успешного создания и действенного развития центров превосходства в бывшем СССР, в том числе в сложных военных и послевоенных условиях развития экономики и общества. Таким образом, возникает задача анализа данного опыта и поиска способов его распространения в современных реалиях для разработки эффективного государственного механизма создания и развития центров превосходства на основе использования подхода «триединые контексты». Обсуждение вопросов их формирования занимает определенную нишу в экономической науке. Отдельное направление в данном контексте составляют теоретические исследования проблем национальной и экономической безопасности страны, которые активно ведутся в Институте экономики РАН. Существенный вклад в развитие этого направления внесли труды Л. И. Абалкина, В. К. Сенчагова, В. В. Иванова, Г. Г. Малинецкого, И. В. Караваевой и др. [1].

Научно-технологической основой национальной безопасности может стать система центров превосходства. Их типология, предложенная С. А. Заиченко [2], включает стратегические, системные и экспериментальные центры превосходства. Большинство исследователей сконцентрировали внимание на экспериментальных центрах превосходства. Университеты 4.0 создают на своей базе центры превосходства

(обеспечивают позиции в международных рейтингах исследовательских предприятий) и центры компетенций (обеспечивают доступность передовых технологий производственным и иным предприятиям) [3].

Историографический подход к исследованию процессов реформирования высшего инженерного образования применен в работе [4], где предложена следующая периодизация: 1803–1863 гг. – зарождение высших инженерных школ в России; 1864–1896 гг. – реформирование инженерного образования; 1915–1917 гг. – незавершенная реформа образования; 1917–1926 гг. – «буржуазные специалисты и пролетаризация вузов»; 1927–1948 гг. – создание отраслевых транспортных институтов в СССР. Другими словами, предпринимается попытка анализа эволюции формирования экспериментальных центров превосходства.

Очевидно, что формирование центров превосходства, особенно стратегических, невозможно без применения государственного механизма и инструментов стимулирования науки и технологий. Отдельные аспекты данной проблемы в историческом контексте раскрываются в работах В. В. Иванова [5], Н. А. Ащеуловой и Э. И. Колчинского [6], Г. А. Власкина [7]. В исследовании С. Л. Парфеновой и А. В. Клыпина проведен количественный анализ деятельности государственных научных центров (ГНЦ) в 2008–2013 гг., показавший, что в исследуемый период деятельность ГНЦ была «слабо ориентирована на реализацию масштабных инновационных проектов с высокой наукоемкой составляющей, направленных на решение важных социально-экономических задач государственного масштаба» [8].

Ряд исследований посвящен эволюции отдельных ключевых отраслей. История становления центров превосходства в высокотехнологичном комплексе представлена в работах А.В. Брыкина [9], М. Ю. Мухина [10] и ряда других исследователей.

Международный опыт формирования центров превосходства представлен в ряде работ зарубежных исследователей [11–13]. Центры превосходства как факторы социального воздействия и их создание в рамках обучения, преподавания исследованы Jorge-García-Reyes [14], Shamzzuzoha et al. [15], Daragmeh, Drane, Light [16], взаимодействие университетов и промышленности представлено в трудах Atta-Owusu, Fitjar, Rodríguez-Pose [17], Yakovlev et al. [18], Ghazinoory, Ameri, Farnoodi [19].

На наш взгляд, формирование стратегических центров превосходства необходимо осуществлять в соответствии с национальными и экономическими интересами, приоритетами научно-технологического и экономического развития страны, обеспечивающими высокие позиции на мировом рынке. В большинстве приведенных выше работ данная задача не рассматривается с этой точки зрения.

### Методы исследования

В исследовании проведен комплексный историко-логический анализ генезиса центров превосходства в СССР и РФ за период с 1920-х гг. по настоящее время. Их предтечей было становление военно-промышленного комплекса в тесной связи с осуществлявшейся тогда индустриализацией страны на основе ее масштабной электрификации и с учетом внешнеполитической конъюнктуры (военные конфликты). Д. Хендрик отмечал: «В 1930-е гг., когда ведущие промышленные державы переживали стагнацию, связанную с Великой депрессией, Советский Союз утроил добычу угля, производство металла, стали и оборудования. Под руководством правительства и в головокружительные сроки были построены гигантские гидроэлектростанции, сталелитейные комбинаты и появились новые промышленные города» [20].

Накопленный в эти годы потенциал продолжал развиваться и в период Великой Отече-

ственной войны, когда центры превосходства формировались вокруг ядерных проектов, а также в области электротехники, радиоэлектроники, авиации, судостроения. Сразу после войны были заложены основы превосходства страны в космической сфере.

В основу методологии исследования в данной статье положен принцип триад. Триада – это триединые контексты, образуемые вычлениением, систематизацией и упорядочением трех компонентов. Принцип триад характеризуется эволюционным, системным и историко-логическим подходом к анализу тех или иных явлений и процессов. Все элементы (части) триад – это принципиально разные понятия, имеющие свои характеристики. Вместе с тем все они равнозначные и неразрывно связаны между собой, во-первых, следующим новым витком на одной спирали развития и, во-вторых, своей преемственностью. Каждое следующее явление или процесс является производным от предыдущего. Помимо этого, триады работают с некоторыми поправками на нелинейность процесса и размытость границ.

Комплекс выделенных и используемых в исследовании триединых контекстов включает следующие составляющие:

#### ■ общие:

«предпосылка → сущность → форма»,  
«прошлое → настоящее → будущее»;

■ в области науки, техники, технологий, производства:

«открытие → изобретение → технология»,  
«наука → техника → производство», «образование → наука → промышленность».

Целью исследования является обобщение опыта формирования центров превосходства в СССР и РФ для выявления эффективных механизмов и инструментов их стимулирования в современных условиях.

### Эволюция понятия

#### «центр превосходства»

Термин «центр превосходства» (Centers of excellence) имеет различные трактовки и интерпретации. Одна из точек зрения – «Центр исследовательского превосходства» (Center of research excellence), то есть структура, осуществляющая исследования в прорывных обла-

стях науки и технологий. Такие центры широко распространены в Швеции, Норвегии, Финляндии и Канаде. Формы существования подобных центров отличаются направленностью: от фундаментальных исследований к инновационному, технологическому и социально-экономическому развитию, а также институциональными рамками. К центрам превосходства в данной трактовке относятся исследовательские советы (Research Councils), комиссии по грантам (Grants Commissions), агентства (Agencies), сетевые структуры (Networks of Centres of Excellence) [21–23]. В этой интерпретации роль ядра центров превосходства отводится исследовательским институциям, в то время как инжиниринговые центры остаются на периферии. Значение производственной составляющей существенно нивелируется. Следует отметить и дотационный подход к стимулированию таких центров (государственное и негосударственное финансирование исследований) [24, 25]. Одной из разновидностей данного типа являются центры исследовательского превосходства с университетским ядром. Для оценки их эффективности чаще всего используются библиометрические показатели [26], служащие основой принятых решений по стимулированию развития подобных центров. Указанный подход, на наш взгляд, не позволяет идентифицировать подобные центры как центры превосходства,

обеспечивающие национальную технологическую и экономическую независимость страны. Их, скорее, можно назвать центрами компетенций.

Менее распространенная в настоящее время точка зрения – центры превосходства как R&D подразделения корпораций [27], которые преобладали в США в первой трети прошлого столетия в форме научно-исследовательских, опытно-конструкторских, экспериментальных лабораторий [28]. Такие структуры являлись не только источником технологического развития корпораций, но и служили генераторами денежных потоков.

Третий вид – центры технологического превосходства с опорой на инжиниринговые структуры. В качестве их ядра могут выступать технологические платформы. В настоящее время круг задач таких центров значительно расширен и включает координацию НИОКР и трансфер технологий [29] с целью создания радикальных инноваций [30].

### Периодизация развития центров превосходства

В исследовании предложена периодизация развития центров превосходства в СССР и РФ с 1920 г. по настоящее время (табл. 1).

Таблица 1

Периодизация развития центров превосходства\*  
Periodization of development of Centers of Excellence\*

| Период                                                     | Характеристика                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1920–1939 гг. Предтеча центров превосходства в СССР        | Становление ВПК СССР в тесной связи с осуществлявшейся в тот период времени индустриализацией страны и с учетом внешнеполитической конъюнктуры (военные конфликты 20–30-х гг. XX в.) |
| 1940–1969 гг. Расцвет                                      | Восстановление и развитие народного хозяйства, результатом чего стало создание ракетно-ядерного щита страны, что в целом обеспечило национальную и экономическую безопасность СССР   |
| 1970–1991 гг. Неустойчивая стабилизация и постепенный спад | Период постепенного спада в экономике (1970–1984 гг.); начало конверсии ВПК (1985–1991 гг.)                                                                                          |
| 1992–2000 гг. «Потерянные годы и проекты»                  | Постепенная деградация плановой административно-командной системы, завершившаяся «шоковой терапией» (1992–1998 гг.). Утрата научно-технологического суверенитета                     |
| 2001–2007 гг. «Тучные годы»                                | Стабилизация в экономике, приоритетное развитие ТЭК, сверхдоходы от продажи нефти. Создание Фонда национального благосостояния, реализация федеральных и региональных программ       |
| * Составлено авторами.                                     |                                                                                                                                                                                      |

| Период                                                                 | Характеристика                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008 г. – 23.02.2022. Новая волна кризисов и неустойчивая стабилизация | Повторяющиеся мировые экономические кризисы, череду которых усиливает пандемия новой коронавирусной инфекции. Процессы импортозамещения, стимулируемые государством. Приоритет: национальная и экономическая безопасность                                                                                                                                                        |
| 24.02.2022 – по н. в. Экономика предложения на протяжении 10–15 лет    | Прежние глобальные цепочки создания стоимости становятся рискованными, очень дорогими. Ближайшая цель – полноценное импортозамещение (вялотекущее с 2014 г.), импортоопережение, а в перспективе обеспечение технологического суверенитета страны, в том числе на основе реализации триады «прогнозирование – планирование – программирование» (планового управления экономикой) |

### Ключевые инструменты механизма формирования центров превосходства

Проведенный анализ позволил выделить следующие ключевые инструменты механизма формирования центров превосходства:

- 1) триаду «прогнозирование → планирование → программирование»;
- 2) координацию и контроль;
- 3) формирование кадрового потенциала в контексте триады «образование → наука → промышленность»;
- 4) формирование технологического потенциала в контексте триады «открытие → изобретение → технология»;
- 5) формирование инфраструктуры научных исследований и разработок;
- 6) капиталовложения/инвестиции.

Данное исследование сфокусировано на первых четырех инструментах. Вопросы формирования инфраструктуры и инвестиционная составляющая являются предметом дальнейших исследований.

*Прогнозирование → планирование → программирование.* Формирование механизма создания центров превосходства, основанного на триаде «прогнозирование → планирование → программирование», осуществлялось постепенно. Изначально ядром триады было планирование. План ГОЭЛРО – государственный план электрификации Советской России, разработанный по заданию и под руководством В. И. Ленина в 1920 г., задал генеральную концепцию развития народного хозяйства страны на долгосрочную перспективу. Это один из первых примеров планирования, основанного на научном анализе и имеющего полидисциплинарную направленность. План ГОЭЛРО положил начало государственной системе планирования в СССР. Он предвосхитил теорию, ме-

тодологию и проблематику пятилетних планов [31]. План ГОЭЛРО создал предпосылки формирования стратегических центров превосходства в СССР. Конкретные шаги по его реализации воплощались в решениях съездов ВКП(б), съездов коммунистической партии СССР и пленумов ЦК КПСС по пятилетним планам развития народного хозяйства. В данных документах развитие науки и техники было одним из ключевых приоритетов.

В марте 1926 г. формулируются три главных направления деятельности Госплана, выстроенных в организационной иерархии: генеральный долгосрочный план → перспективный пятилетний план → ежегодные текущие планы.

Первый опыт макроэкономического планирования демонстрирует подготовленный по инициативе Н. А. Вознесенского Генеральный план развития народного хозяйства на период 1943–1957 гг., нацеленный на формирование стратегического превосходства страны и ее национальной безопасности в экстремальных условиях.

Помимо этого, предпринимается переход к комплексному многовариантному планированию на основе моделей. Реализуется многоступенчатая оптимизация перспективного плана на различных уровнях: народного хозяйства, многоотраслевых комплексов, отраслей (ответственный – ЦЭМИ АН СССР). Внедряется принцип оптимального размещения производства (ответственный – Совет по изучению производительных сил (СОПС) при Госплане СССР). Начинают использоваться отраслевые и межрайонные балансы (ответственный – ИЭиОПП Сибирского отделения АН СССР).

*Программирование.* Планы не оставались «на бумаге». Для их выполнения принимались и реализовывались конкретные программы, представляющие по сути «сверхпроект-

ты». К примеру, «Урановый проект», стартовавший 12 апреля 1943 г. с создания под руководством Игоря Курчатова Лаборатории № 2 Академии наук для решения задач ядерной физики и техники. Результатом его реализации стало обеспечение лидерства СССР в ядерной сфере. К более позднему периоду относится «сверхпроект» создания глобальной навигационной спутниковой системы. 15 января 1964 г. было принято правительственное решение № 8 о создании отечественной навигационной спутниковой системы «Циклон». Первый спутник ГЛОНАСС был выведен СССР на орбиту 12 октября 1982 г. [32].

*Прогнозирование.* Идея разработки прогнозов как этапа обоснования народнохозяйственных планов стала воплощаться во второй половине 1960-х гг. [33]. Научно-технические прогнозы (на 10–15 и более лет), как основа для выбора наиболее эффективных путей развития народного хозяйства и отдельных его отраслей, стали активно использоваться в 1970-е. Постановлением Президиума АН СССР и Государственного комитета СМ СССР по науке и технике от 16 февраля 1977 г. № 14/49 для управления НТП при АН СССР, СМ СССР, Госплане СССР были созданы специальные комиссии по ряду основных отраслей народного хозяйства, которые готовили прогнозы и Основные направления экономического и социального развития страны на долгосрочный период.

В период «косыгинских реформ» были разработаны принципы, в соответствии с которыми в середине каждой пятилетки предполагалось разрабатывать прогнозы на 20 лет и основные направления на 10–15 лет (в разных отраслях), а для того чтобы желающие могли внести изменения в эти документы, они публиковались в центральных газетах. Такие документы были разработаны на 1976–1980, 1981–1985 и 1985–1990 гг. В феврале 1986 г. на базе ряда научных подразделений ЦЭМИ АН СССР был организован Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН (ИНП РАН) как головная организация по разработке социально-экономических разделов комплексных программ научно-технического прогресса СССР на 20 лет.

В России в 1992 г. произошел отказ от экономики планового типа. Понятие «планирование» – очень широкий термин, включающий и проекты, и программы, и стратегии. В результате положение дел с триадой «прогнозирование

→ планирование → программирование» иное, и оно разительно отличается от ситуации в СССР, поскольку упор делается фактически только на программирование. Речь идет о так называемых «пассивных прогнозах».

Итак, успешный опыт СССР, который был заимствован и реализуется в КНР, позволяет сделать заключение о том, что в современной ситуации целесообразно вернуться к полноценной триаде «прогнозирование → планирование → программирование» и воссоздать пятилетние планы на основе долгосрочных прогнозов научно-технологического развития России. В условиях экономики предложения, возможно, частично ввести директивное планирование и в дальнейшем обеспечить плавный переход к индикативному планированию. В Концепцию государственного стратегического планирования РФ должна быть встроена Стратегия национальной безопасности России, относительно направлений корректировки которой уже несколько лет ведется широкая дискуссия.

Помимо этого, требуются эффективные инструменты для согласования планов и программ, разрабатываемых различными хозяйствующими субъектами, а также заключение многоуровневых соглашений в целях достижения сбалансированности показателей плана с учетом национальных приоритетов.

*Координацию* научных исследований по выполнению заданий, определяемых решениями съездов ВКП(б), коммунистической партии СССР и пленумов ЦК КПСС по пятилетним планам, с начала рассматриваемого периода осуществляла Академия наук СССР. Академия наук, детище Петра Великого, первое научное учреждение России, благодаря деятельности выдающихся ученых быстро превратилась в ведущее. Постановлением ЦИК и СНК от 27 июля 1925 г. она была официально признана высшим научным учреждением страны и оставалась в таком статусе все годы существования СССР [34].

В 1946–1958 гг. Академия наук играла роль координатора в большинстве отраслей промышленности СССР. При ее участии были достигнуты важные результаты, обеспечившие возможность развития ключевых отраслей промышленности и выход СССР в 1960–1970-е гг. по ряду важнейших направлений на передовые рубежи мировой науки и техники. В РФ статус и роль Академии наук оказались существенно

ниже, а ее потенциал как возможного ядра системы центров превосходства использован недостаточно. Ликвидация в 2013 г. РАН как самостоятельной научной структуры мирового уровня стала логическим продолжением политики, проводимой в РФ. В настоящее время ситуация меняется, РАН снова становится востребованным генератором знаний и технологий в стране.

*Контроль* за реализацией планов и программ осуществлялся со стороны Государственного комитета СССР по науке и технике, образованного в 1948 г. (указом Президиума Верховного Совета СССР), который был ликвидирован в 1991 г. В задачи данной структуры также входило руководство межотраслевыми научно-техническими комплексами, обеспечение приоритетного развития научно-технических направлений, закрепленных за этими структурами, контроль соответствия уровня их исследований и разработок высшим мировым достижениям и перспективным тенденциям развития науки и техники совместно с АН СССР.

В РФ Академия наук наряду с научной осуществляла и продолжает осуществлять координационную деятельность региональных отделений и региональных научных центров РАН. При этом вне поля зрения остается признание за Академией наук ведущей роли в аналитическом обеспечении реализации приоритетов научно-технологического развития страны. В современной России такая роль отводится создаваемым советам по приоритетным направлениям научно-технологического развития, а с 15 марта 2021 г. координацию деятельности этих советов осуществляет Комиссия по научно-технологическому развитию Российской Федерации.

Выполняя функции координации и частично контроля, АН СССР представляла собой многофункциональный базис для формирования центров превосходства мирового уровня и сама являлась своеобразным стратегическим центром превосходства. Достигнутые в СССР результаты научно-технологического и промышленного развития свидетельствуют об эффективности данной модели, в том числе в современных условиях экономики предложения. В этой связи может быть выдвинуто предположение о целесообразности смещения баланса в распределении функций координации и кон-

троля науки и технологий в сторону научных организаций, прежде всего Академии наук РФ.

*Формирование кадрового потенциала в триедином контексте «образование → наука → промышленность».* Вопросы формирования кадрового потенциала стратегических центров превосходства стояли на повестке уже с 1920-х гг., когда «принципиально по-новому решение задач связывалось с переходом к массовому и обязательному общему и профессиональному образованию, резкому повышению роли Академии наук, созданию целой сети головных научно-исследовательских институтов, с рождением новых отраслей промышленности, созданием сотен и тысяч крупных промышленных предприятий гражданского и оборонного назначения». В этот же период началось активное выращивание «спецов» («лобби» научно-технического прогресса в СССР) [35]. «Персоналии» выдвигали и реализовывали высшие стратегические цели развития науки и технологий, а в целом и государства, и общества. В 1920-е гг. были сделаны открытия мирового уровня (А. Фридман – теория расширяющейся Вселенной, Н. Семенов – теория цепных реакций, Н. Кольцов – теория мутагенеза и хромосомная наследственность, Л. Ландау и П. Капица (1938) – явление сверхтекучести жидкого гелия). Этот список можно продолжить и на последующие десятилетия, вплоть до 1980-х гг.

Однако к началу 1990-х российская наука потеряла существенную часть своего кадрового потенциала. С 2000 г. число организаций, занимающихся научными исследованиями и разработками, серьезно сократилось, в первую очередь за счет числа НИИ. И если в 2000 г. количество НИИ составляло 2686, то к 2019 г. их осталось 1618, тогда как в бывшем СССР в 1960-е гг. было 3548 НИИ [36], то есть наблюдается спад более чем в два раза. При этом такое резкое сокращение не компенсируется ростом внутренних научно-исследовательских и опытно-конструкторских подразделений компаний. В качестве мер стимулирования отметим президентскую целевую программу «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 гг. и до 2005 г.», в ходе реализации которой на базе университетов образовано 300 учебно-научных центров (УНЦ). В 2006 г. стартуют программы, направленные на усиление инновационного потенциала вузов, в том

числе национальный проект «Образование», «Инновационная образовательная программа (ИОП) вузов» на 2006–2008 гг. Происходит слияние вузов и образование федеральных университетов. В 2008 г. выходит Указ Президента о создании Национальных исследовательских университетов, принимается программа «Образование и развитие инновационной экономики: внедрение современной модели образования на 2009–2012 гг.».

В России на период с 2008 г. приходится наибольшая активность по формированию кадрового потенциала науки и технологий. Государство осознало значимость университетов, и повышенное внимание к их развитию проявилось, в частности, в форме так называемых «инициатив превосходства», которые в последние 20–30 лет просматривались в целом ряде стран (Китай, Германия, Франция, Япония и др.). В РФ данная форма поддержки была реализована в форме Программы «5–100», которая далее была продолжена как Программа стратегического академического лидерства «ПРИОРИТЕТ-2030».

Для обеспечения кадрового потенциала центров превосходства необходим системный подход и требуется вернуться к полноценной триаде «образование → наука → промышленность». В этом контексте уместно обратить внимание на инициативу В. В. Путина по национальному проекту «Наука и университеты», нацеленному на достижение значительных результатов по приоритетным стратегическим направлениям развития РФ за счет объединения вузов, научных организаций и передовых предприятий в консорциумы, ориентированные на прорывные исследования.

*Формирование технологического потенциала в контексте триады «открытие → изобретение → технология».* Важнейшим направлением развития центров превосходства в настоящее время является формирование технологического потенциала страны, системным базисом которого выступают инструменты реализации переходов в триаде «открытие → изобретение → технология». Результатом их использования должно стать создание центров технологического превосходства с опорой на инжиниринговые структуры.

Исторически отечественные исследователи и инженеры объединялись в общества, которые в дальнейшем служили основой создания лабо-

раторий, научно-исследовательских институтов и производственных предприятий, деятельность которых была направлена на преодоление технологического и технического отставания страны и зависимости от зарубежных поставщиков. Общество морских инженеров было основано в 1896 г. в Санкт-Петербурге. В 1899 г. было создано квалификационное общество, носившее в разное время названия «Русский регистр», «Российский регистр» и, наконец, «Регистр СССР». В 1915 г. появился Союз морских инженеров. В качестве иллюстрации высочайшего уровня научно-технических разработок инженеров того времени приведем пример Э. Е. Гуляева (1851–1919). По мнению специалистов, «его главное достижение – система подводной конструктивной защиты кораблей – сохраняет актуальность и в наше время» [37]. 31 марта 1918 г. в Петрограде в Центральной Научно-Технической лаборатории утвержден устав Российского общества радиоинженеров (РОРИ). Лаборатории РОРИ создавались в разных городах, например в Нижнем Новгороде создана лаборатория под руководством М. А. Бонч-Бруевича [38].

Стремительные темпы реализации всех планов и программ в значительной степени были обеспечены выстраиванием научно-производственных цепочек: от исследований и разработок к инженерным испытаниям и собственно серийному производству. Обратим внимание, что первым в России центром инженерных испытаний в области судостроения стал Опытный бассейн Морского ведомства, официальное начало работы которого датируется 1894 г. Вокруг него стали создаваться КБ и НИИ (ныне Крыловский государственный научный центр, один из крупнейших мировых исследовательских центров в области кораблестроения и проектирования, обеспечивающий национальную безопасность РФ в области морской деятельности).

В описанном «технологическом» подходе к формированию центров превосходства существуют риски смещения фокуса на промышленность/индустрию и прикладные исследования в ущерб фундаментальным. Для нивелирования таких рисков может быть использован опыт бывшего СССР. В 1920 гг. исследования и разработки носили прикладной характер и выполнялись силами научно-инженерных обществ, однако уже в конце 1930-х гг. стали

создаваться научно-исследовательские организации, занимающиеся вопросами фундаментальной науки. Так, в 1938 г. в Отделении технических наук АН СССР был образован Институт машиноведения АН СССР, ставший головным в области машиноведения, а в 1939 г. – Институт механики. Эти два института в рамках первых пятилеток индустриализации страны возглавили фундаментальные и прикладные разработки новых важных отраслей промышленности – станкостроения, автомобильного, тракторного и транспортного машиностроения, авиации и др.

В современной России предпринимались неоднократные попытки возрождения центров превосходства указного типа. К примеру, в 2013 г. принята дорожная карта в области инжиниринга и промышленного дизайна, в которой в качестве ключевых целей заявлен значительный рост индустрии инжиниринга и ее диверсификация по направлениям (машиностроение, электроника, биотехнологии, композитные материалы) для создания технологического потенциала в критически важных отраслях. В 2020 г. утверждена новая редакция упомянутой дорожной карты, в которой содержится идея создания центров технологического превосходства. Для ее реализации предусмотрены задачи разработки нормативной базы, включая «положение об инжиниринговом центре и центре промышленного дизайна на базе инновационного территориального кластера», а также подготовка и реализация приоритетных проектов с применением государственной поддержки, в том числе «масштабирование программы создания инжиниринговых центров и центров промышленного дизайна на базе образовательных организаций высшего образования, научных организаций и государственных компаний, компаний с государственным участием и частных компаний, а также разработка центров технологического превосходства на базе частных компаний». В рамках дорожной карты разработана «Концепция создания и развития в Российской Федерации центров технологического превосходства на базе частных компаний».

## ВЫВОДЫ

1. Основные отличия подходов к формированию центров превосходства в бывшем СССР и РФ – отсутствие комплексности в применении различных инструментов и нивелирование

роли ученых и практиков в управлении данными процессами.

2. Наличие некоторой положительной тенденции по частичному восстановлению роли научных организаций, в первую очередь Академии наук, занимающейся в основном фундаментальными теоретическими исследованиями в деле обеспечения интересов национальной безопасности и технологического развития страны. Вместе с тем на современном этапе положение Академии наук соответствует XVIII в., то есть ей отводится роль исключительно научного центра. В нынешних условиях в соответствии с курсом на активное импортозамещение и обеспечение технологического суверенитета необходимо форсировать полноценное использование уникального опыта взаимодействия государства и такого мощного центра превосходства, каким являлась Академия наук.

3. Следует обратить большое внимание на особенности использования инструментов триады «прогнозирование → планирование → программирование» в СССР и РФ. В СССР данная триада реализовалась изначально как «планирование → программирование → прогнозирование» по причине срочного решения ключевых, важных экономических задач в условиях мобилизационной экономики и была результативной. В РФ триада получила на практике реализацию, но в усеченном виде «программирование → прогнозирование».

4. В СССР активно использовалась концепция генерального конструктора сложной технической системы, существовала мощная система инженерного образования, обеспечивающая технологические прорывы. После распада СССР произошел развал инженерной школы, что в итоге привело к разрушению наукоемкой промышленности страны. За период с 1990-х по 2010-е гг. в стране практически не создавались высокотехнологические предприятия. В настоящее время Правительство РФ предпринимает активные попытки восстановления отечественной инженерной школы. В ноябре 2022 г. Минобрнауки России подготовило Проект постановления Правительства РФ для создания передовых инженерных школ, согласно которому «к 2030 году на базе вузов должны быть созданы 30 школ в партнерстве с высокотехнологичными компаниями, такими как РЖД, Росатом, Ростех, корпорация “Иркут” и другими».

5. В бывшем СССР наука обеспечивала формирование и высокую результативность стратегических центров превосходства по большинству отраслей. В РФ наука до недавнего времени локально обеспечивала формирование и высокую результативность стратегических центров превосходства по отдельным направлениям, в частности в космических и ядерных проектах, а в условиях пандемии еще в медицине и фармацевтике. В настоящее время ситуация меняется. Так, положения в документе «Концепция создания и развития в Российской Федерации центров технологического превосходства на базе частных компаний» касаются не только критических отраслей, но промышленности в целом. Одним из разработчиков концепции является Торгово-промышленная (ТПП) палата РФ. В решении заседания Совета ТПП России по промышленному развитию и конкурентоспособности экономики России от 16.07.2021 отмечается необходимость «осуществить возврат к советской системе государственных научных и конструкторско-технологических центров для консолидации усилий и поддержки государством внедрения инновационных продуктов». Для устранения дисбалансов в мерах государственной политики поддержки Центров превосходства эксперты рекомендуют перевести вопрос создания таких центров на более системный уровень. Необходим орган, который будет осуществлять координацию и контроль.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Караваева, И. В. Национальная экономическая безопасность в теоретических исследованиях Института экономики РАН / И. В. Караваева // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2020. № 2. С. 27–42. <https://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10013>.
2. Заиченко, С. А. Центры превосходства в системе современной научной политики / С. А. Заиченко // Форум. 2008. Т. 2, № 1. С. 42–50.
3. Дежина, И. Г. Научные «центры превосходства» в российских университетах: смена моделей / И. Г. Дежина // ЭКО. 2020. № 4. С. 87–109. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-87-109>.
4. Смык, А. Ф. Исторический опыт реформирования инженерного образования в России / А. Ф. Смык // Вопросы истории, естествознания, техники. 2015. Т. 36, № 3. С. 537–558.
5. Иванов, В. В. Научно-технологическая политика в условиях новой стратегии развития России / В. В. Иванов // Инновации. 2019. № 4. С. 3–7.
6. Ащеулова, Н. А. Реформы науки в России (историко-социологический анализ) / Н. А. Ащеулова, Э. И. Колчинский // Вопросы истории, естествознания и техники. 2010. Т. 31, № 1. С. 95–119.
7. Власкин, Г. А. Проблемы научно-технологического развития России и социалистических стран в истории исследований Института экономики РАН / Г. А. Власкин // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2020. № 3. С. 27–39. <https://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10027>.
8. Парфенова, С. Л. Новый вектор развития государственных научных центров: от инерционных изменений к активизации в научно-технологических сетях / С. Л. Парфенова, А. В. Клыпин // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2015. № 3. С. 73–94.
9. Брыкин, А. В. Причины системных проблем в развитии радиоэлектронной и электронной промышленности России. Ч. 1: Период 1917–1945 гг. / А. В. Брыкин // Электроника: наука технология бизнес. 2021. № 4. С. 148–154. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.205.4.148.154>.
10. Мухин, М. Ю. Авиапромышленность СССР в 1921–1941 гг. / М. Ю. Мухин. М.: Наука, 2006. 320 с.
11. Kuzhabekova, A. From Importing to Exporting World Class: Can Kazakhstan Scale Up Its Successful Center of Excellence Project to a Regional Education Hub / A. Kuzhabekova // International Journal of Educational Development. 2024. Vol. 106. Art. 103016. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2024.103016>.
12. Kinyondo, A. ‘Centres of Excellence’ for Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Tanzania: Assumptions around Artisanal Entrepreneurship and Formalization / A. Kinyondo, C. Huggins // The Extractive Industries and Society. 2020. Vol. 7, Iss. 2. P. 758–766. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.03.011>.
13. Wiszniewski, B. Building Polish Space Sector – from Small Islands of Excellence to a National Innovation Ecosystem / B. Wiszniewski // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, Iss. 8. P. 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.073>.
14. Jorge-García-Reyes, C. Chapter 5 – Libraries as Centers of Excellence: Quality Management as Inducer of Libraries’ Social Impact / C. Jorge-García-Reyes // Boosting the Knowledge Economy. Key Contributions from Information Services in Educational, Cultural and Corporate Environments. Elsevier Ltd., 2022. P. 63–76. (Chandos Information Professional Series). <https://doi.org/10.1016/B978-1-84334-772-9.00014-2>.
15. Identified Necessary Skills to Establish a Center of Excellence in Vocational Education for Green Innovation / A. Shamzzuzoha [et al.] // Cleaner Environmental Systems. 2022. Vol. 7. Art. 100100. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100100>.
16. Daragmeh, A. K. Needs Assessment and Beyond in the Setup of Centers for Teaching and Learning Excellence: An-Najah University Center as a Case Study / A. K. Daragmeh, D. Drane, G. Light // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012. Vol. 47. P. 841–847. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.745>.
17. Atta-Owusu, K. What Drives University-Industry Collaboration? Research Excellence or Firm Collaboration Strategy? / K. Atta-Owusu, R. D. Fitjar, A. Rodríguez-Pose // Technological Forecasting and Social Change. 2021. Vol. 173. Art. 121084. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121084>.
18. Creation of Technical University Center of Excellence / A. N. Yakovlev [et al.] // Procedia – Social and Beha-

- vioral Sciences. 2015. Vol. 166. P. 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.517>.
19. Ghazinoory, S. An Application of the Text Mining Approach to Select Technology Centers of Excellence / S. Ghazinoory, F. Ameri, S. Farnoodi // *Technological Forecasting and Social Change*. 2013. Vol. 80, Iss. 5. P. 918–931. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.001>.
  20. Headrick, D. R. *Technology: A World History* / D. R. Headrick. Oxford University Press. New York, 2009.
  21. Towards New Triple Helix Organisations? A Comparative Study of Competence Centers as Knowledge, Consensus and Innovation Spaces / M. Meyer [et al.] // *R&D Management*. 2019. Vol. 49, No 4. P. 555–573. <https://doi.org/10.1111/radm.12342>.
  22. Orr, D. New Forms for Public Research: A Concept Paper on Research Excellence Initiatives / D. Orr, M. Jaeger, J. Wespel. Paris: OECD, DSTI/STP/RIHR, 2011.
  23. Luukkonen, T. Understanding the Dynamics of Networks of Excellence / T. Luukkonen, M. Nedeva, R. Barré // *Science and Public Policy*. 2006. Vol. 33, No 4. P. 239–252. <https://doi.org/10.3152/147154306781778966>.
  24. Hellström, T. Centres of Excellence and Capacity Building: from Strategy to Impact / T. Hellström // *Science and Public Policy*. 2018. Vol. 45, No 4. P. 543–552. <https://doi.org/10.1093/scipol/scx082>.
  25. Borlaug, S. B. Moral Hazard and Adverse Selection in Research Funding: Centers of Excellence in Norway and Sweden / S. B. Borlaug // *Science and Public Policy*. 2016. Vol. 43, No 3. P. 352–362. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv048>.
  26. Identifying Management of Technology and Innovation (MOT) and Technology Entrepreneurship (TE) Centers of Excellence / R. Giasolli [et al.] // *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 173. Art. 121075. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121075>.
  27. Frost, T. S. Centers of Excellence in Multinational Corporations / T. S. Frost, J. M. Birkinshaw, P. C. Ensign // *Strategic Management Journal*. 2002. Vol. 23, No 11. P. 997–1018. <https://doi.org/10.1002/smj.273>.
  28. Федорович, В. А. США: федеральная контрактная система и экономика: Механизм регулирования / В. А. Федорович, А. П. Патрон, В. П. Заварухин. М.: Наука, 2002.
  29. Proskuryakova, L. The Use of Technology Platforms as a Policy Tool to Address Research Challenges and Technology Transfer / L. Proskuryakova, D. Meissner, P. Rudnik // *The Journal of Technology Transfer*. 2017. Vol. 42, No 1. P. 206–227. <https://doi.org/10.1007/s10961-014-9373-8>.
  30. Technological Platforms as a Tool for Creating Radical Innovations / A. A. Chursin [et al.] // *Journal of the Knowledge Economy*. 2021. Vol. 13, No 1. P. 264–275. <https://doi.org/10.1007/s13132-020-00715-4>.
  31. Гвоздецкий, В. Л. Судьба плана ГОЭРЛО (к 100-летию программы народно-хозяйственного развития Советской России) / В. Л. Гвоздецкий // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2021. Т. 42, No 4. С. 656–683. <https://doi.org/10.31857/s020596060017426-0>.
  32. Глобальные навигационные спутниковые системы и особенности их развития в США и СССР / Ю. С. Дубинко [и др.] // *Вопросы истории, естествознания и техники*. 2012. Т. 33, № 2. С. 90–107.
  33. Клепач, А. Развитие социально-экономического прогнозирования и идеи А. И. Анчишкина / А. Клепач, Г. Куранов // *Вопросы экономики*. 2013. № 12. С. 143–155.
  34. Гиндилис, Н. А. Наука выживать: российское академическое сообщество в 90-е гг. XX в. / Н. А. Гиндилис // *Вопросы истории, естествознания и техники*. 2017. Т. 38, № 4. С. 718–755.
  35. Вершинина, Л. П. Из истории Совета главных конструкторов: документальное исследование / Л. П. Вершинина // *Вопросы истории, естествознания и техники*. 2015. Т. 36, № 2. С. 255–277.
  36. Шульгина, И. В. *Инфраструктура науки в СССР* / И. В. Шульгина. М.: Наука, 1988. 153 с.
  37. Рассол, И. Р. Судьба архива инженера-кораблестроителя Э. Е. Гуляева / И. Р. Рассол // *Судостроение*. 2014. № 1 (812). С. 79–81.
  38. Пять лет РОПИ // *Техника связи*. 1923. Т. II, вып. 1–2. С. 41–44.

Поступила 30.04.2024

Подписана в печать 02.07.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

## REFERENCES

1. Karavaeva I. V. (2020) National Economic Security in Theoretical Studies of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, (2), 27–42 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10013>.
2. Zaichenko S. A. (2008) Centres of Excellence in the System of Modern Science Policy. *Forsait = Foresight*, 2 (1), 42–50 (in Russian).
3. Dezhina I. G. (2020) Scientific “Centres of Excellence” in Russian Universities: Change of Models. *ECO*, (4), 87–109. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-87-109> (in Russian).
4. Smyk A. F. (2015) Historical Experience of Reforming Engineering Education in Russia. *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 36 (3), 537–558 (in Russian).
5. Ivanov V. V. (2019) Scientific and Technology Policy in the Context of the New Development Strategy of Russia. *Innovatsii = Innovations*, (4), 3–7 (in Russian).
6. Ashcheulova N. A., Kolchinsky E. I. (2010) Science Reforms in Russia (Historical and Sociological Analysis). *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 31 (1), 95–119 (in Russian).
7. Vlaskin G. A. (2020) Problems of Scientific and Technological Development of Russia and Socialist Countries in the History of Research of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, (3), 27–39 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2073-6487-2020-10027>.
8. Parfenova S. L., Klypin A. V. (2015) New Vector of Development of State Scientific Centres: from Inertial Changes to Activation in Scientific and Technological Networks. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, (3), 73–94 (in Russian).
9. Brykin A. V. (2021) Causes of System Problems in the Development of Radio-Electronic and Electronic Industry of Russia. Part 1. *Elektronika: Nauka Tekhnologiya Bizness = Electronics: Science, Technology, Business*, (4),

- 148–154 (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.205.4.148.154>.
10. Mukhin M. Yu. (2006) *Aviation Industry of the USSR in 1921–1941*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
11. Kuzhabekova A. (2024) From Importing to Exporting World Class: Can Kazakhstan Scale Up Its Successful Center of Excellence Project to A Regional Education Hub. *International Journal of Educational Development*, 106, 103016. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2024.103016>.
12. Kinyondo A., Huggins C. (2020) ‘Centres of Excellence’ for Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Tanzania: Assumptions around Artisanal Entrepreneurship and Formalization. *The Extractive Industries and Society*, 7 (2), 758–766. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.03.011>.
13. Wiszniewski B. Building Polish Space Sector – from Small Islands of Excellence to A National Innovation Ecosystem. *IFAC-PapersOnLine*, 52 (8), 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.073>.
14. Jorge-García-Reyes C. (2022) Chapter 5 – Libraries as Centers of Excellence: Quality Management as Inducer of Libraries’ Social Impact. *Boosting the Knowledge Economy. Key Contributions from Information Services in Educational, Cultural and Corporate Environments. Chandos Information Professional Series*. Elsevier Ltd., 63–76. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84334-772-9.00014-2>.
15. Shamzzuzoha A., Cisneros Chavira P., Kekäle T., Kuusniemi H., Jovanovski B. (2022) Identified Necessary Skills to Establish A Center of Excellence in Vocational Education for Green Innovation. *Cleaner Environmental Systems*, 7, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100100>.
16. Daragmeh A. K., Drane D., Light G. (2012) Needs Assessment and Beyond in the Setup of Centers for Teaching and Learning Excellence: An-Najah University Center as a Case Study. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 47, 841–847. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.745>.
17. Atta-Owusu K., Fitjar R. D., Rodriguez-Pose A. (2021) What Drives University-Industry Collaboration? Research Excellence or Firm Collaboration Strategy? *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121084. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121084>.
18. Yakovlev A. N., Kostikov K. S., Kozyreva I. N., Martyushev N. V. (2015) Creation of Technical University Center of Excellence. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 166, 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.517>.
19. Ghazinoory S., Ameri F., Farnoodi S. (2012) An Application of the Text Mining Approach to Select Technology Centers of Excellence. *Technological Forecasting and Social Change*, 80 (5), 918–931. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.001>.
20. Headrick D. R. (2009) *Technology: A World History*. Oxford University Press. New York.
21. Meyer M., Kuusisto J., Grant K., De Silva M., Flowers S., Choksy U. (2019) Towards New Triple Helix Organisations? A Comparative Study of Competence Centers as Knowledge, Consensus and Innovation Spaces. *R&D Management*, 49 (4), 555–573. <https://doi.org/10.1111/radm.12342>.
22. Orr D., Jaeger M., Wespel J. (2011) *New Forms for Public Research: A Concept Paper on Research Excellence Initiatives*. Paris, OECD, DSTI/STP/RIHR.
23. Luukkonen T., Nedeva M., Barré R. (2006) Understanding the Dynamics of Networks of Excellence. *Science and Public Policy*, 33 (4), 239–252. <https://doi.org/10.3152/147154306781778966>.
24. Hellström T. (2018) Centres of Excellence and Capacity Building: from Strategy to Impact. *Science and Public Policy*, 45 (4), 543–552. <https://doi.org/10.1093/scipol/scx082>.
25. Borlaug S. B. (2016) Moral Hazard and Adverse Selection in Research Funding: Centers of Excellence in Norway and Sweden. *Science and Public Policy*, 43(3), 352–362. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv048>.
26. Giasolli R., Groen A., Haak R., Pieck M. (2021) Identifying Management of Technology and Innovation (MOT) and Technology Entrepreneurship (TE) Centers of Excellence. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121075. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121075>.
27. Frost T. S., Birkinshaw J. M., Ensign P. C. (2002) Centers of Excellence in Multinational Corporations. *Strategic Management Journal*, 23 (11), 997–1018. <https://doi.org/10.1002/smj.273>.
28. Fedorovich V. A., Patron A. P., Zavarukhin V. P. (2002) *USA: Federal Contract System and Economy: Mechanism of Regulation*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
29. Proskuryakova L., Meissner D., Rudnik P. (2017) The Use of Technology Platforms as A Policy Tool to Address Research Challenges and Technology Transfer. *The Journal of Technology Transfer*, 42 (1), 206–227. <https://doi.org/10.1007/s10961-014-9373-8>.
30. Chursin A. A., Dubina I. N., Carayannis E. G., Tyulin A. E., Yudin A. V. (2021) Technological Platforms as A Tool for Creating Radical Innovations. *Journal of the Knowledge Economy*, 13 (1), 264–275. <https://doi.org/10.1007/s13132-020-00715-4>.
31. Gvozdetzky V. L. (2021) The Fate of the GOERLO Plan (to the 100th Anniversary of the Programme of National Economic Development of Soviet Russia). *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 42 (4), 656–683.
32. Dubinko Yu. S., Kuskov V. D., Mordvinov B. G., Novikova E. L., Panteleev V. M. (2012) Global Navigation Satellite Systems and Peculiarities of Their Development in the USA and USSR. *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 33 (2), 90–107 (in Russian).
33. Klepach A., Kuranov G. (2013) Development of Socio-Economic Forecasting and the Ideas of A.I. Anchishkin. *Voprosy Ekonomiki*, (12), 143–155 (in Russian).
34. Gindilis N. A. (2017) Science to Survive: the Russian Academic Community in the 90s of the Twentieth Century. *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 38 (4), 718–755 (in Russian).
35. Vershinina L. P. (2015) From the History of the Council of Chief Designers: Documentary Research. *Voprosy Istorii, Estestvoznaniya i Tekhniki = Studies in the History of Science and Technology*, 36 (2), 255–277 (in Russian).
36. Shulgina I. V. (1988) *Infrastructure of Science in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
37. Rassol I. R. (2014) Fate of the Archive of the Shipbuilding Engineer E.E. Gulyaev. *Sudostroenie = Shipbuilding*, (1), 79–81 (in Russian).
38. Five Years of RORI [Russian Society of Radio Engineers]. (1923) *Tekhnika Svyazi [Communication Technology]*, II. (1–2), 41–44 (in Russian).

Received: 30.04.2024

Accepted: 02.07.2024

Published online: 30.09.2024