### минобрнауки РОССИИ

### Известия

## **Юго-Западного** государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Tom 10 № 2 / 2020

### **Proceedings**

of the Southwest State University

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

**Scientific Journal** 

Vol. 10 № 2 / 2020



### Известия Юго-Западного государственного университета.

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya:. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie)

Научный рецензируемый журнал Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки) – 05.11.01.

Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки) – 05.11.13.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) – 05.11.17

Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки) – 05.12.13.

Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) – 05.13.01.

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

**Емельянов Сергей Геннадьевич,** д-р техн.наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Томакова Римма Александровна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Алгулиев, д-р техн. наук, профессор;

Ю. С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор;

А. А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;

А. Л. Жизняков, д-р техн. наук, профессор;

Ж. Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;

С. А. Зинкин, д-р техн. наук, доцент;

30 30 Тун, канд. техн. наук, профессор;

И. В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;

Н. А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор;

Е. Н. Коровин, д-р техн. наук, профессор;

А. Н. Пылькин, д-р техн. наук, профессор;

Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор;

В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, профессор;

С. П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;

А. С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;

**В. С. Титов**, д-р техн.наук, профессор, заслуженный деятель науки России;

С. А. Филист, д-р техн. наук, профессор;

А. В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;

А. А. Ханова, д-р техн. наук, доцент

### Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

### Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26, Факс: +7(4712) 50-48-00. E-mail: rio\_kursk@mail.ru

### Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-44620 от 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Сайт журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

© Юго-Западный государственный университет, 2020

© creative Commons Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Типография:

Полиграфический центр Юго-Западного государственного университета, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94

### Подписка и распространение:

журнал распространяется по подписке.

Подписной индекс журнала 44291 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

### Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен А. Е. Серебряковой

Подписано в печать 25.05.20. Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Усл.печ.л. 16,3. Тираж 1000 экз. Заказ 31.



# Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

### Peer-reviewed scientific journal Published since 2011

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as information and intelligent systems; mechatronics, robotics; image recognition and processing; system analysis and decision making; simulation in medical and technical systems; devices and methods for monitoring the natural environment.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU.

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctorial or candidate thesis in the following areas:

Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences) – 05.11.01.

Devices and methods of control of the natural environment, substances, materials and products (technical Sciences) – 05.11.13.

Devices, systems and medical devices (technical Sciences) – 05.11.17.

Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences) – 05.12.13.

System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences) – 05.13.01.

### **EDITOR-IN-CHIEF**

**Sergei G. Emelianov,** Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

### **DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

**Rimma A. V. Tomakova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

#### EDITORIAL BOARD

R. M. Alguliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

Y. S. Bekhtin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

A. A. Burmaka, Dr. of Sci. (Engineering),

Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

V. N. Gridin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

A. L. Zhiznyakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

Zh. T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

S. A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering),

Associate Professor;

Zo Zo Thun, Candidate of Engineering, Professor;

I. V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering);

N. A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

E. N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

A. N. Pylkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering),

Professor;

V. G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

S. P. Seryogin, Doctor of Sci. (Medical), Professor;

A. S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

V. S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

S. A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

A. V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;

A. A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering),

Associate Professor

### Founder and Publisher:

"Southwest State University"

### Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

**Phone**: (+74712) 22-25-26, **Fax:** (+74712) 50-48-00. **E-mail**: rio\_kursk@mail.ru

### The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media (PI №FS77-44620 of 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Web-site: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

### **Printing office:**

Printing Center
of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str., 94,
Kursk 305040, Russian Federation

#### **Subscription and distribution:**

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 44291
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: four times a year

Free-of-control price.

Original lay-out design: A. E. Serebryakova

© Southwest State University, 2020

© creative Commons Publications are available in accordance with the Creative Commons Attribution 4.0 License

Signed for printing 25.05.2020. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets: 16,3.

Circulation 1000 copies. Order 31.

### СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	8
Разработка интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок	8
И. О. Кирильчук, В. В. Юшин, А. В. Иорданова, Е. А. Грибов	
<b>МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА</b>	<u>2</u> 4
Модификация алгоритма расчета конструктивно-нелинейных систем с односторонними связями 2	24
В. В. Гилка, А. В. Чумаков, Окороджи Дюк Филип Чике, А. С., Кузнецова, Ю. А. Качанов	
Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов4	10
С. А. Тяпкин, И. Е. Мухин, Д. С. Коптев	
Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей	57
С. А. Тяпкин, И. Е. Мухин, Д. С. Коптев	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Разработка инструмента для анализа речи пациента при болезни Паркинсона 6	38
Окороджи Дюк Филип Чике, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. С. Кузнецова, Гилка Вадим Викторович	
<b>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ</b>	34
Биотехническая система персонифицированной магнитотерапии с комбинированной обратной связью	34
М. А. Ефремов, С. А. Филист, Д. С. Забанов, М. Б. Мяснянкин,  Д. Ю. Савинов	
Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровьяюююююююююююююю10	)2
Н. А. Кореневский, А. В. Титова	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ11	18
Оригинальные стать	
Моделирование процесса агрегации эритроцитов методом Монте-Карло для диагностики оптоакустическим методом11	18
Д. А. Кравчук	
Модификация металлической связки для увеличения времени износа алмазных боров. Сравнительная оценка износостойкости стандартных и гибридных стоматологических боров12	26
Л. В. Половнева, В. П. Чуев	
К сропочию авторов	40

### CONTENT

Original articles

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Development of an Internet portal for recording spontaneous unauthorized landfills	8
Vasilii Yushin, Iraida Kiril'chuk, Anastasiya lordanova, Evgenii Gribov	
MECHATRONICS, ROBOTICS	24
Modification of the Algorithm for Calculation of Constructually Nonlinear Systems with One-Way Connections	24
Vadim V. Gilka, Artem V. Chumakov, Okoroji Duke Philip Chike, Agnessa S. Kuznetsova, Yurii A. Kachanov	
Analysis of the Existing Methods and Possible Ways to Increase The Effectiveness of the Diagnostic System for Aircraft Engines	
S. A. Tyapkin, I. E. Mukhin, D. S. Koptev	
Method of Joint Application of the Vibration Signal Structure Indicator and The Known Results of Identification Measurements in the Problems of Preventive Detection of Faults of Aircraft Engines	57
S. A. Tyapkin, I. E. Mukhin, D. S. Koptev	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	68
Development OF A Tool for Analyzing the Speech of a Patient with Parkinson's Disease	<b>68</b>
Okoroji Duke Philip Chike, Orlova Yulia Alexandrovna, Rozaliev Vladimir Leonidovich, Kuznetsova Agnessa Sergeevna, Gilka Vadim Viktorovich	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	
Biotechnical System of Personalized Magnetotherapy with Combined Feedback	·· 84
M. A. Efremov, S. A. Filist, D. S. Zabanov, M. B. Myasnyankin, D. Yu. Savinov	
Fuzzy Models for Assessing the Impact of Radio Frequency Electromagnetic Fields on Health	· 102
N. A. Korenevsky, A. V. Titova	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	. 118
Simulation of the Erythrocyte Aggregation Process by the Monte Carlo Method for Diagnostics by the Optoacoustic Method	- 118
D. A. Kravchuk	
Modification of the Metal Bond to Increase the Wear Time of Diamond Burs. Comparative Assessment of Wear Resistance of Standard and Hybrid Dental Burs	. 126
L. V. Polovneva, V. P. Chuev	
Infirmation for Authors	. 140

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.4

### Разработка интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок

И. О. Кирильчук $^1 \boxtimes$ , В. В. Юшин $^1$ , А. В. Иорданова $^1$ , Е. А. Грибов $^1$ 

#### Резюме

**Цель исследования** состоит в повышении санитарной безопасности населения за счет разработки инструментов обнаружения стихийных несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов на основе использования современных геоинформационных и WEB-технологий. Ежедневно на территории крупных и средних населенных пунктов образуются большие объемы твердых коммунальных отходов, несвоевременный вывоз и нарушение правил транспортировки и размещения которых, а также их неправильная утилизация грозят значительными экологическими проблемами. Для минимизации рисков возникновения указанных проблем, непосредственно влияющих на качество жизни населения, экологическую и социальную безопасность развития городских систем, необходимо создание новых и совершенствование на основе современных информационных технологий существующих методов и инструментов управления объектами размещения твердых коммунальных отходов, под которыми в данном исследовании понимаются несанкционированные свалки, стихийно возникающие на городской территории и в пригороде.

**Методы.** Главным методологическим инструментом для выполнения всех этапов исследования служит системный анализ. Для разработки интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок была использована CMS Joomla — так называемая система управления содержимым сайта, преимуществом которой является возможность одновременного совмещения нескольких различных технологий: создания страницы в визуальном режиме из готовых блоков, изменения блоков из коллекции, программирования полностью авторских блоков.

**Задачи.** Основной задачей исследования является разработка интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок.

**Результаты.** В процессе исследования была разработана структура интернет-портала для оперативного обнаружения и учета стихийных несанкционированных свалок, включающая модуль пользователя, модуль администратора, основное ядро и базу данных; построены основные режимы работы с сайтом.

© Кирильчук И. О., Юшин В. В., Иорданова А. В., Грибов Е. А., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

Заключение. Авторами проанализированы основные теоретические аспекты проектирования интернетсайтов, рассмотрены процесс разработки и особенности функционирования интернет-портал по учету стихийных несанкционированных свалок. Широкое использование населением разработанного интернетпортала будет способствовать развитию механизма привлечения общественности и повышения социальной сознательности для решения экологических проблем, связанных с утилизацией твердых коммунальных отходов.

**Ключевые слова:** интернет-портал; несанкционированные свалки; твердые коммунальные отходы; Joomla; CMS.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.

**Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования**: Разработка интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок / И. О. Кирильчук, В. В. Юшин, А. В. Иорданова, Е. А. Грибов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 8–23.

Поступила в редакцию 01.04.2020

Подписана в печать 22.04.2020

Опубликована 25.05.2020

### Development of an Internet Portal for Recording Spontaneous Unauthorized Landfills

Vasilii V. Yushin<sup>1</sup>, Iraida O. Kiril'chuk<sup>1</sup> ⊠, Anastasiya V. Iordanova<sup>1</sup>, Evgenii A. Gribov<sup>1</sup>

### **Abstract**

The purpose of the research is to improve public health safety by developing tools for detecting spontaneous unauthorized landfills of solid municipal waste based on the use of modern geoinformation and WEB technologies. Every day, large volumes of solid municipal waste are generated on the territory of large and medium-sized settlements. Untimely removal and violation of the rules of transportation and placement of waste, as well as their improper disposal, threaten significant environmental problems. To minimize the risks of these problems that directly affect the quality of life of the population, environmental and social security of urban systems, it is necessary to create new and improve existing methods and tools for managing solid municipal waste disposal facilities based on modern information technologies, which in this study are understood as unauthorized landfills that occur spontaneously in the urban area and in the suburbs.

**Methods.** The main methodological tool for performing all stages of research is a system analysis. To develop an Internet portal for accounting for spontaneous unauthorized dumps, we used CMS Joomla, a so-called site content management system, the advantage of which is the ability to simultaneously combine several different technologies: creating a page in visual mode from ready-made blocks, changing blocks from a collection, programming completely authored blocks.

Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

**Objectives.** The main objective of the study is to develop an Internet portal for recording spontaneous unauthorized landfills.

**Results.** In the course of the research, the structure of the Internet portal for rapid detection and accounting of natural unauthorized dumps was developed, including the user module, the administrator module, the main core and the database; the main modes of working with the site were built.

**Conclusion.**The authors analyzed the main theoretical aspects of designing Internet sites, considered the development process and features of the functioning of the Internet portal for accounting for natural unauthorized dumps. The wide use of the developed Internet portal by the population will contribute to the development of a mechanism for attracting the public and increasing social awareness to solve environmental problems associated with the disposal of solid municipal waste.

Keywords: Internet portal; unauthorized landfills; solid municipal waste; Joomla; CMS.

**Funding**: The Work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MK-941.2019.5.

**Conflict of interest.** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Yushin V., Kiril'chuk I., Iordanova A., Gribov E. Development of an Internet portal for recording spontaneous unauthorized landfills. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(2): 8–23. (In Russ.)

Received 01.04.2020 Accepted 22.04.2020 Published 25.05.2020

\*\*\*

### Введение

Развитие информационных технологий является неотъемлемой составляющей жизни современного общества. Информатизация проникает практически во все сферы нашей деятельности, так или иначе оказывая на них непосредственное влияние. С самого своего появления информатизация преследовала цель качественного улучшения и совершенствования методов взаимодействия человека с окружающей средой. Сюда можно отнести различного рода информационные и образовательные сайты по экологии и смежным направлениям. Проблема загрязнения окружающей природной среды отходами производства и потребления, в том числе твердыми коммунальными отходами,

беспокоит практически все страны мира. Так, ежедневно на территории крупных и средних населенных пунктов образуются большие объемы твердых коммунальных отходов, несвоевременный вывоз и нарушение правил транспортировки и размещения которых, а также их неправильная утилизация грозят значительными экологическими последствиями. Для минимизации рисков возникновения указанных проблем необходимо создание новых и совершенствование на основе современных информационных технологий ствующих методов и инструментов управления объектами размещения твердых коммунальных отходов. В данном случае под объектами размещения отходов подразумеваются стихийно возникающие несанкционированные свалки.

Проблему оперативного обнаружения и своевременной ликвидации стихийных несанкционированных свалок можно решить лишь путем привлечения широкого круга общественности [1]. На сегодняшний день для взаимодействия с большим количеством людей посредством размещения какой-либо информации и реализации процесса обратной связи существует такой способ, как создание интернет-порталов и сайтов. Таким образом, цель исследования состоит в повышении санитарной безопасности населения за счет разработки инструментов обнаружения стихийных несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов на основе использования современных геоинформационных и WEB-технологий [2; 3; 4; 5; 6].

### Материалы и методы

Существует несколько распространенных способов разработки и реализации интернет-порталов [7; 8; 9; 10]. Одним из главных является программирование. Для этого способа необходимо знать язык гипертекстовой разметки страницы HTML, отвечающий за размещение информации на странице. Кроме того, для лучшего восприятия настраивается оформление посредством каскадных таблиц стилей — CSS. Для того чтобы интернет-портал мог взаимодействовать с базой данных, необхо-

димо использование скриптового языка программирования PHP, с помощью которого генерируются страницы с определенной информацией. Для взаимодействий с HTML-элементами на странице необходимо написание кода на языке программирования JavaScript, который выполняется непосредственно в браузере на компьютере пользователя. Таким образом, с помощью данных инструментов можно создать абсолютно любой функционал и внешний вид портала, но занимает это достаточно большое количество времени [11; 12; 13].

Еще одним способом создания интернет-порталов является использование визуальных редакторов. В данном способе страницы портала создаются путем добавления шаблонных блоков из коллекции. Таким образом, исходный код страницы не редактируется, и конструктор пользуется исключительно функционалом, предоставленным разработчиками того или иного визуального редактора. Однако преимуществом такого способа является возможность создания портала за очень короткий промежуток времени [14; 15].

Помимо вышеперечисленного существуют еще специализированные сервисы. С их помощью возможно создавать и редактировать страницы как в визуальном редакторе, так и в исходном коде. В таком случае не требуется искать хостинг и доменное имя третьего уровня для размещения портала, так как в большинстве случаев они предостав-

ляются бесплатно. Однако владельцы сервисов зарабатывают на этом путем размещения рекламы на созданных страницах и ограничения бесплатного функционала [16; 17].

Еще один популярный способ создания интернет-портала - использование CMS (Content Management System). В этом случае используется определенная система управления содержимым сайта, позволяющая создавать интернет-порталы, совмещая несколько технологий одновременно. Так, существует возможность создания страницы в визуальном режиме из готовых блоков, а при необходимости – изменение блоков из коллекции или программирование полностью своих блоков. В настоящее время существуют достаточно функциональные системы, распространяемые бесплатно и не добавляющие на страницы принудительную рекламу. Размещение интернет-порталов, созданных с помощью CMS, поддерживается многими хостингами с возможностью полностью выбрать домен и быстро развернуть портал на сервере. Кроме того, при необходимости можно разработать собственные функциональные модули с помощью языков программирования, если не хватает предоставленных возможностей [18; 19; 20].

На основе анализа различных способов создания интернет-порталов было принято решение о разработке портала для учета стихийных несанкционированных свалок с помощью бесплатно распространяемой CMSJoomla. При этом

возникла необходимость разработки дополнительных модулей для взаимодействия с интерактивной картой несанкционированных свалок и базой данных, хранящей информацию об обнаруженных несанкционированных свалках.

### Результаты и их обсуждение

На первом этапе разработки интернет-портала была произведена установка системы управления контентом на сервер. С помощью администраторской панели системы были спроектированы и размечены страницы пользователя и администратора интернет-ресурса. Затем было произведено проектирование базы данных для хранения информации о несанкционированных свалках. На основе таблицы базы данных разрабатывались модули для загрузки и отображения информации на интерактивной карте. Для этого была изучена документация АРІ (программный интерфейс приложения) «Яндекс.Карты». С его помощью осуществляется отображение карты на странице и загрузка на карту отметок о несанкционированных свалках с подробной информацией.

Интернет-портал предоставляет пользователю при посещении сгенерированные страницы из стандартных блоков, содержащихся в ядре CMS, и модулей, подключаемых отдельно. Кроме того, для хранения информации системы и модулей используется обязательная часть интернет-портала — база данных. На рисунке 1 предоставлена структура интернет-портала.

На рисунке 2 представлены имена полей базы данных, хранящей инфор-

мацию о несанкционированных свалках.

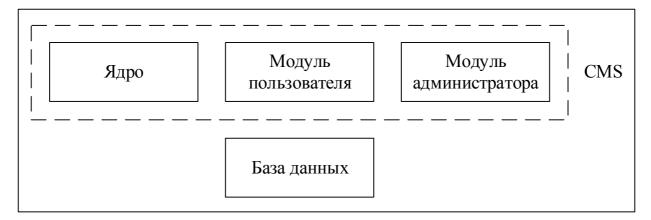


Рис. 1. Структура интернет-портала

Fig. 1. Structure of the Internet portal

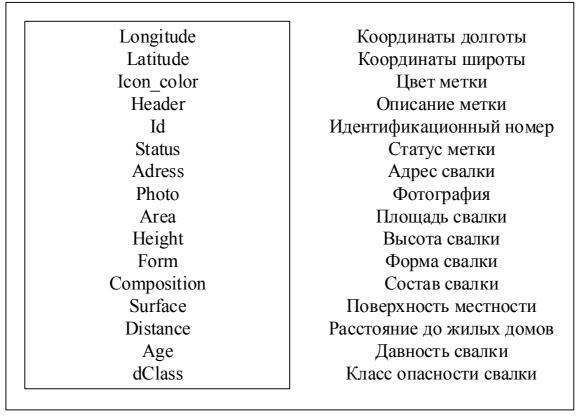


Рис. 2. Имена полей базы данных

Fig. 2. Names of data base fields

База данных заполняется с помощью полей в форме обратной связи на странице интернет-портала, а отображение полученной информации осу-

ществляется посредством интерактивной карты. Форма ввода информации о стихийной свалке представлена ниже (рис. 3).

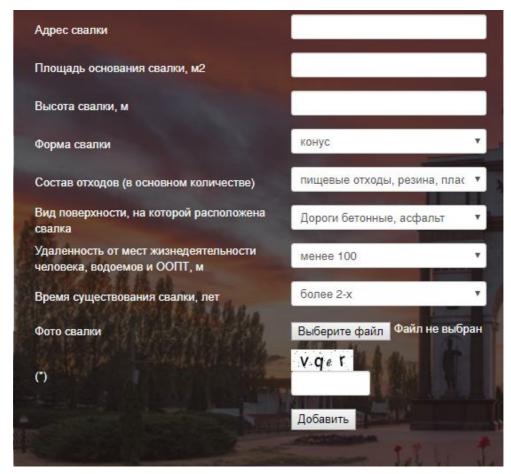


Рис. 3. Ввод информации об обнаруженной свалке

Fig. 3. Entering information about a detected landfill

Интерактивная карта для обозначения меток расположения несанкционированных свалок представлена ниже (рис. 4).

У портала есть два варианта взаимодействия с пользователем:

1. Режим пользователя, в котором пользователь заходит на главную страницу интернет-портала и не проходит авторизацию. В данном режиме пользователь может просматривать интерак-

тивную карту с отметками о свалках и получать информацию о конкретной свалке путем нажатия на ее отметку. После нажатия появляется дополнительная часть карты с информацией. При нажатии на другую отметку информация обновляется в соответствии с выбранной свалкой. На рисунке 5 представлена схема взаимодействия пользователя с порталом в режиме просмотра информации.

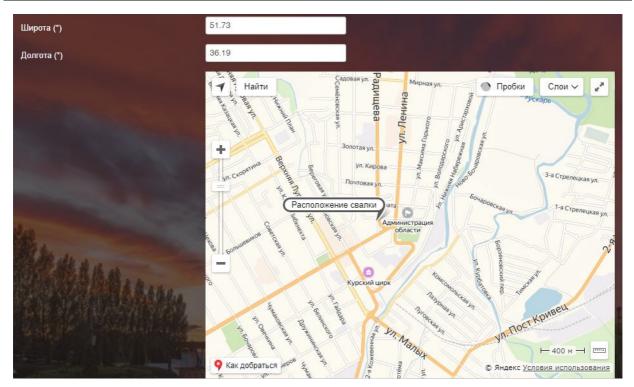


Рис. 4. Интерактивная карта для обозначения местоположения несанкционированной свалки

Fig. 4. Interactive map to indicate the location of an unauthorized landfill



Рис. 5. Взаимодействие пользователя с картой

Fig. 5. User interaction with the map

На рисунке 6 представлено графическое отображение данного режима работы.

Кроме того, пользователь может внести на рассмотрение администратором проекта отметку, содержащую сведения о новой несанкционированной свалке. Это возможно в форме обратной связи ниже на странице. Пользователь на дополнительной карте перетаскивает отметку, тем самым определяя координаты свалки. После этого требуется ввести данные о форме, размерах свал-

ки и расстоянии до жилых домов в соответствующие поля, расположенные ниже карты. Для исключения возможного спама пользователю необходимо ввести контрольный код с картинки и нажать кнопку отправки данных. На рисунке 7 представлена схема взаимодействия пользователя с порталом в режиме добавления информации.

Графическое отображение данного взаимодействия представлено ниже (рис. 8).

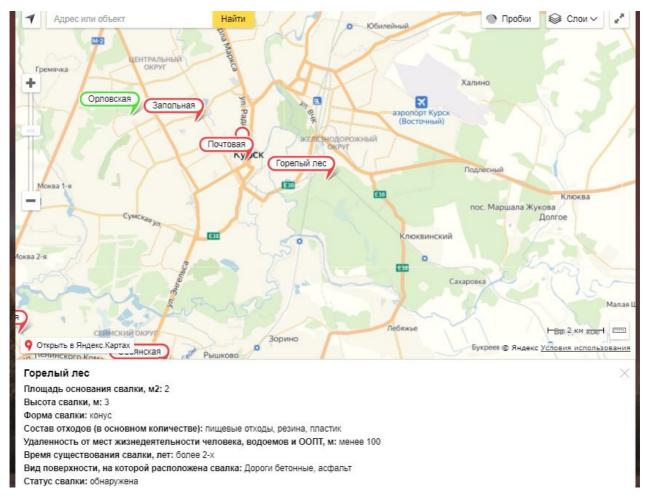


Рис. 6. Просмотр информации об отмеченных несанкционированных свалках

Fig. 6. View information about marked unauthorized landfills

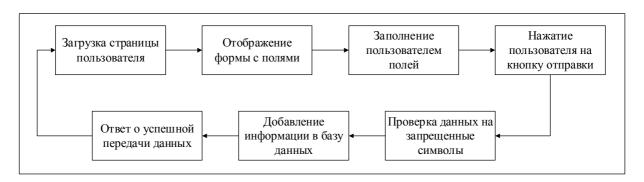


Рис. 7. Взаимодействие пользователя с формой обратной связи

Fig. 7. User interaction with the feedback form

2. Режим администратора, в котором пользователь заходит на отдельную страницу и проходит авторизацию как администратор проекта. После успеш-

ного входа открывается страница, на которой есть карта с отображением меток несанкционированных свалок, доступных для просмотра пользователям

без авторизации, и меток, переданных через форму обратной связи. На этой странице администратор имеет возможность редактирования информации о свалках посредством нажатия на соответствующие метки. В полях ниже карты появляется информация о свалке, доступная для редактирования. Кроме того, имеется поле со статусом метки. В

данном поле администратор выбирает одно из действий с меткой: «опубликовать», «ожидание» и «удалить». После выбора статуса «опубликовать» метка становится доступна для просмотра всеми пользователями на карте главной страницы. Схема взаимодействия с порталом в режиме администратора представлена ниже (рис. 9).

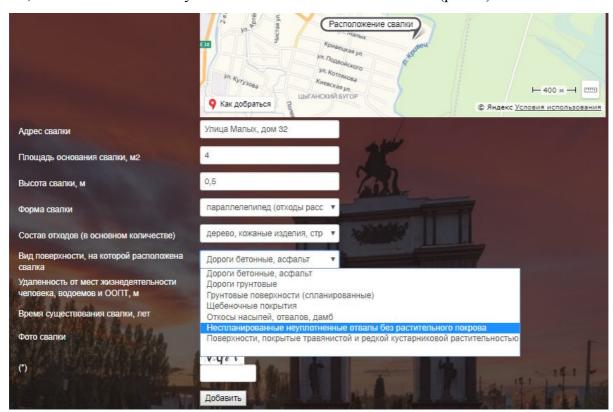


Рис. 8. Добавление информации об обнаруженной несанкционированной свалке на карту

Fig. 8. Adding information about an unauthorized dump to the map

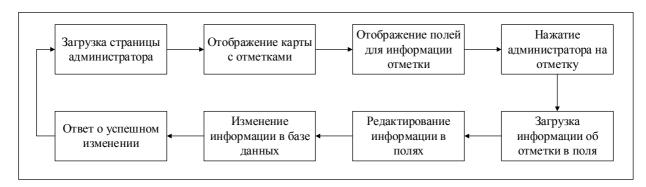


Рис. 9. Взаимодействие пользователя с порталом как администратора проекта

Fig. 9. User interaction with the portal as a project administrator

Графическое отображение данного взаимодействия представлено ниже (рис. 10).

Кроме этого, администратору предоставлена возможность внесения информации о классе опасности обна-

руженной свалки, который рассчитывается с помощью внешнего подключаемого программного модуля, что дает возможность провести ранжирование обнаруженных свалок для составления плана их дальнейшей ликвидации.

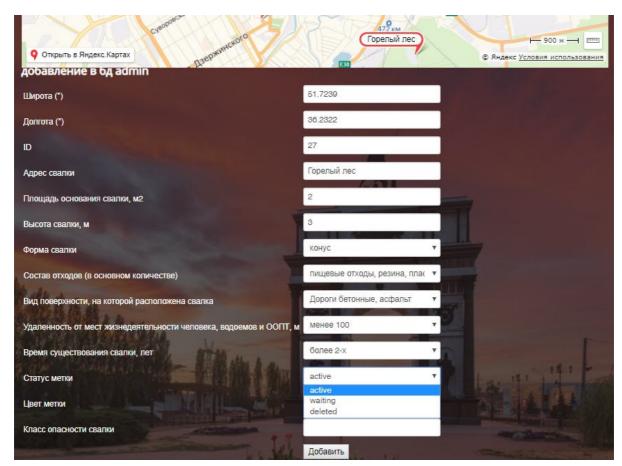


Рис. 10. Редактирование информации об обнаруженной свалке в режиме администратора

Fig. 10. Edit information about a detected dump in administrator mode

### Выводы

Разработанный интернет-портал нацелен, прежде всего, на усиление инструментальных возможностей сервисов сети Интернет, позволяющих использовать портал не только в качестве информационного ресурса, но и в качестве инструментария для решения природоохранных задач, связанных со стихийными несанкционированными свалками.

Этот портал также может обеспечить взаимодействие органов исполнительной власти и неравнодушных граждан как пользователей сети Интернет. Обладая указанными свойствами, разработанный портал не только в полной мере реализует идеи информационного развития общества, но и предполагает постоянное накопление информации о несанкционированных свалках от пользователей,

имеющей реальную ценность при организации и проведении санитарной уборки города. В связи с этим развитие портала нами видится в дальнейшей разработке и внедрении инструментов для работы с обнаруженными свалками непо-

средственно на сайте, без подключения внешних программных модулей, что будет способствовать более быстрой обработке информации и, как следствие, осуществлению оперативной ликвидации несанкционированных свалок.

### Список литературы

- 1. Преликова Е. А., Зотов В. В., Кирильчук И. О. Применение технологии краудсорсинга в публичном управлении // Государство и общество: вчера, сегодня, завтра. Серия: Социология. 2015. № 15 (1). С. 74-84.
- 2. Оценка загрязнения городской среды с примененеем ГИС-технологий / В. М. Попов, Е. В. Меркулова, Н. А. Чепиков, И. О. Рыкунова // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2008. № 2-18. С. 48-51.
- 3. Кирильчук И. О., Гнездилова А. В. Направление совершенствования системы геоинформационного учета стихийных несанкционированных свалок // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей X Международной научнопрактической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 142-149.
- 4. Иорданова А. В. Использование Web-технологий в решении экологических и природоохранных задач // Медико-экологические информационные технологии 2019: сб. науч. ст. по материалам XXII Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Юго-Западного государственного университета / ответственный редактор Н. А. Кореневский; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. С. 100-105.
- 5. Development of typification method of unauthorized landfills / I. Kirilchuk, A. Barkov, A. Iordanova, M. Kotkina // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2019. Vol. 19, no 5.1. P. 165-171.
- 6. Kirilchuk I., Barkov A. Methodological aspects of the development of automated information and analytical waste management systems // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 16, Ecology, Economics, Education and Legislation, 2016. P. 577-582.
- 7. Загрядская Н. В. Разработка сайта при помощи систем управления содержимым сайта // Образование. Технология. Сервис. 2010. Т. 1. С. 56-58.
- 8. Чеховской С. В., Петрова А. Н. Разработка сайта на языке РНР // Научнотехническое творчество аспирантов и студентов: сб. материалов XXXXVII науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / отв. редактор Э. А. Дмитриева; Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. Комсомольск-на-Амуре, 2017. С. 1167-1169.
- 9. Лушников Н. Д. Основные аспекты разработки и создания сайтов // Инновационное развитие. 2017. № 11 (16). С. 27-28.

- 10. Рындина А. С. Выбор платформы для разработки web-сайта // Вестник современных исследований. 2017. № 10-1 (13). С. 103-107.
- 11. Иванова О. Г., Корнеева Т. В. Проектирование и разработка системы безопасности сайта на скриптовом языке программирования PHP // Качество науки качество жизни. 2010. № 2. С. 41-42.
- 12. Закутаева К. В., Смагина И. В. Современные технологии разработки сайта и управления им // Экономическая среда. 2019. № 2 (28). С. 15-24.
- 13. Кувайцев А. В., Мукминов Р. Р. Анализ средств разработки web-страниц // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 8 (76). С. 4.
- 14. Хабибуллаева Р. Р., Минкин А. В. Веб-редактор как инструмент создания сайта // Форум молодых ученых. 2018. № 10 (26). С. 1206-1209.
- 15. Вострикова Ю. А. Обзор бесплатных визуальных редакторов для создания сайтов // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. 2012. № 3 (18). С. 109-111.
- 16. Дятлов В. В., Иванова Т. С., Маслов В. А. Анализ возможностей по созданию сайтов, предоставляемых сервисом Googlesites // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы: сб. науч. ст. VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой; Пензенский государственный университет. Пенза, 2019. С. 287-289.
- 17. Никитин П. В., Горохова Р. И. Особенности проектирования и конструирования сайтов с применением новых информационных технологий // Современные информационные технологии и ИТ-образование: сб. XI Междунар. науч.-практ. конф. / под редакцией В. А. Сухомлина. М.: Лига интернет-медиа, 2016. С. 171-176.
- 18. Диева А. В. Проблема выбора CMS-системы для разработки и продвижения web-сайта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 9. С. 310-312.
- 19. Новиков Н. С., Эфенди Ф. И. Разработка сайтов на основе систем управления контентом (СМS) // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 10. С. 30.
- 20. Герасимова А. В. СМS-технологии как современное средство для создания веб-сайта // Наука, образование и культура. 2019. № 6 (40). С. 19-22.

### References

- 1. Prelikova E. A., Zotov V. V., Kirilchuk I. O. Primenenie tekhnologii kraud-sorsinga v publichnom upravlenii [Application of crowdsourcing technology in public administration]. Gosudarstvo i obshchestvo: vchera, segodnya, zavtra. Seriya: Sotsiologiya = State and society: yesterday, today, tomorrow. Series: Sociology, 2015, no. 15 (1), pp. 74-84. (In Russ.)
- 2. Popov V. M., Merkulova E. V., Chepikov N. A., Rykunova I. O. Otsenka zagryazneniya gorodskoi sredy s primeneneem GIS-tekhnologii [Assessment of urban environment pollution with the use of GIS technologies]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni*-

versiteta. Seriya: Stroitel'stvoi transport = Proceedings of Orel state technical University. Series: Construction and transport, 2008, no. 2-18, pp. 48-51. (In Russ.)

- 3. Kirilchuk I. O., Gnezdilova A. V. [Direction of improving the system of geoinformation accounting of natural unauthorized dumps]. Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda. Sbornik statei X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual problems of ecology and labor protection. Collection of articles of the X International scientific and practical conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018, pp. 142-149. (In Russ.)
- 4. Iordanova A. V. [The Use of Web-technologies in solving environmental and environmental problems]. Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii 2019. Sbornik nauchnykh statei po materialam XXII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 55-letiyu Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Medico-ecological information technologies-2019. Collection of scientific articles on the materials of the XXII International scientific and technical conference dedicated to the 55th anniversary of the South-Western state University]. Kursk, Southwest State University Publ., 2019, pp. 100-105. (In Russ.)
- 5. Kirilchuk I., Barkov A., Iordanova A., Kotkina M. Development of typification method of unauthorized landfills. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2019, vol. 19, no. 5.1, pp. 165-171.
- 6. Kirilchuk I., Barkov A. Methodological aspects of the development of automated information and analytical waste management systems. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 16, Ecology, Economics, Education and Legislatio, 2016, pp. 577-582.
- 7. Zagryadskaya N. V. Razrabotka saita pri pomoshchi sistem upravleniya soderzhimym saita [Site Development using site content management systems]. *Obrazovanie. Tekhnologiya. Servis = Obrazovanie. Technology. Service*, 2010, vol. 1, pp. 56-58. (In Russ.)
- 8. Chekhov S. V., Petrova A. N. [Development of the site in PHP]. Nauchnotekhnicheskoe tvorchestvo aspirantov i studentov. Sbornik materialov XXXXVII nauchnotekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov [Scientific and technical creativity of postgraduates and students. Collection of materials XXXXVII scientific and technical. Conf. of students and postgraduates]; ed. by E. A. Dmitrieva. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State Technical University Publ., 2017, pp. 1167-1169. (In Russ.)
- 9. Lushnikov N. D. Osnovnye aspekty razrabotki i sozdaniya saitov [Main aspects of site development and creation]. *Innovatsionnoe razvitie = Innovative development*, 2017, no. 11 (16), pp. 27-28. (In Russ.)
- 10. Ryndina A. S. Vybor platformy dlya razrabotki web-saita [Choosing a platform for developing a web site]. *Vestnik sovremennykh issledovanii = Bulletin of modern research*, 2017, no. 10-1 (13), pp. 103-107. (In Russ.)
- 11. Ivanova O. G., Korneeva T. V. Proektirovanie i razrabotka sistemy bezopasnosti saita na skriptovom yazyke programmirovaniya PHP [Design and development of the site

- security system in the PHP script programming language]. *Kachestvo nauki kachestvo zhizni = Quality of science-quality of life*, 2010, no. 2, pp. 41-42. (In Russ.)
- 12. Zakutaeva K. V., Smagina I. V. Sovremennye tekhnologii razrabotki saita i upravleniya im [Modern technologies of site development and management]. *Ekonomicheskaya sreda = Economic environment*, 2019, no. 2 (28), pp. 15-24. (In Russ.)
- 13. Kuvaytsev A. V., Mukminov R. R. Analiz sredstv razrabotki web-stranits [Analysis of web page development tools]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern scientific research and innovation*, 2017, no. 8 (76), p. 4. (In Russ.)
- 14. Khabibullayeva R. R., Minkin A. V. Veb-redaktor kak instrument sozdaniya saita [Web editor as a tool for creating a site]. *Forum molodykh uchenykh = Forum of young scientists*, 2018, no. 10 (26), pp. 1206-1209. (In Russ.)
- 15. Vostrikova Yu. A. Obzor besplatnykh vizual'nykh redaktorov dlya sozdaniya saitov [Review of free visual editors for creating websites]. *Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii v pedagogicheskom obrazovanii = Information and communication technologies in pedagogical education*, 2012, no. 3 (18), pp. 109-111. (In Russ.)
- 16. Dyatlov V. V., IvanovaT. S., Maslov V. A. [Analysis of opportunities for creating sites provided by Google sites]. Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy. Sbornik nauchnykh statei VI Vserossiiskoi mezhvuzovskoi nauchnoprakticheskoi konferentsii [Information technologies in science and education. Problems and prospects. Collection of scientific articles VI vseros. inter-University. scientific and practical Conf.]; ed. by L. R. Fionova. Penza, Penza State University Publ., 2019, pp. 287-289. (In Russ.)
- 17. Nikitin P. V., Gorokhova R. I. [Features of design and construction of sites using new information technologies]. Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie. Sbornik XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Modern information technologies and it-education. Proceedings of the XI Intern. scientific.-pract. Conf.]; ed. by V. A. Sukhomlin's. Moscow, League of Internet-media Publ., 2016, pp. 171-176. (In Russ.)
- 18. Dieva A. V. Problema vybora CMS-sistemy dlya razrabotki i prodvizheniya websaita [The Problem of choosing a CMS system for developing and promoting a web site]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2014, no. 9, pp. 310-312. (In Russ.)
- 19. Novikov N. S., Efendi F. I. Razrabotka saitov na osnove sistem upravleniya kontentom (CMS) [Development of websites based on content management systems (CMS)]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* = *Molodezhny nauchno-tekhnicheskiy Vestnik*, 2015, no. 10, pp. 30. (In Russ.)
- 20. Gerasimova A. V. CMS-tekhnologii kak sovremennoe sredstvo dlya sozdaniya vebsaita [CMS technologies as a modern tool for creating a website]. *Nauka, obrazovanie i kul'tura = Science, education and culture*, 2019, no. 6 (40), pp. 19-22. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the Authors

Кирильчук Ираида Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: iraida585@mail.ru ORCID: 0000-0001-8636-9340 Researcher ID: N-8966-2016

Юшин Василий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: otios@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1391-4229

Иорданова Анастасия Владимировна, аспирант кафедры охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru ORCID: 0000-0001-7780-497X Researcher ID:AAH-7282-2020

Грибов Евгений Алексеевич, студент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: gr981@yandex.ru

**Iraida O. Kirilchuk,** Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: iraida585@mail.ru ORCID: 0000-0001-8636-9340 Researcher ID: N-8966-2016

Vasilii V. Yushin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University,

Kursk, Russian Federation e-mail: otios@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1391-4229

Anastasiya V. Iordanova, Post-Graduate Student of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7780-497X Researcher ID: AAH-7282-2020

**Evgenii A. Gribov,** Student of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: gr981@yandex.ru

### МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА

### **MECHATRONICS, ROBOTICS**

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.4:624.07

### Модификация алгоритма расчета конструктивно-нелинейных систем с односторонними связями

### В. В. Гилка<sup>1</sup>, А. В. Чумаков<sup>1</sup>, Окороджи Дюк Филип Чике<sup>1</sup>, А. С. Кузнецова<sup>1</sup> ⊠, Ю. А. Качанов<sup>1</sup>

#### Резюме

**Цель исследования** заключается в создании алгоритма и программного модуля для анализа стержневых систем с односторонними связями и сложных строительных конструкций, на основе классической смешанной формы (КСФ) метода конечных элементов, позволяющего повысить эффективность, надежность и качество расчетов.

**Методы.** Если обратиться к области строительной механики, то в качестве объекта воздействия выступает конечный элемент рассматриваемого сооружения. В конкретной узловой точке конечно-элементной сетки, связанной с узлом на контуре конечного элемента, прикладывается единичное воздействие (кинематическое, силовое и т. д.) и находятся отклики на это воздействие во всех узлах на контуре конечного элемента. Эти отклики также будут как силовыми, так и деформационными.

Таблица полученных откликов составляется по принципу, который применяют для формирования матрицы жёсткости (реакций) в традиционном МКЭ и именуется как матрица откликов конечных элементов (КЭ). Применение данной матрицы откликов КЭ представляет возможным алгоритмизацию расчетов по МКЭ в классической смешанной форме так же продуктивно, как и в классическом методе конечных элементов в перемещениях.

Метод, который реализует матрицу откликов для конструкции и системы разрешающих уравнений, устроен по тем же принципам, как и классический метод конечных элементов в перемещениях.

Результатом такого расчета являются как перемещения, так и усилия в узловых точках конечно-элементной сетки.

Метод КЭ в классической форме смешанного типа, представленный авторами, позволяет произвести расчеты с той же степенью удобства алгоритмизации и формализации, как и общепринятый метод конечных элементов в перемещениях.

Предлагаемая форма МКЭ свободна от некоторых существенных недостатков традиционного МКЭ.

Точность общенаучных результатов заключается в правильной и хорошо сформированной формулировке в рамках традиционных методов строительной механики, расчета сложных стержневых конструкций, а также использовании тех же принципов, методов и сравненииполученных результатов решаемых тестовых задач с данными, которые были получены на основе традиционных методов МКЭ и метода перемещений.

© Гилка В. В., Чумаков А. В., Окороджи Дюк Филип Чике, Кузнецова А. С., Качанов Ю. А., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) пр. им. Ленина, 28, Волгоград 400005, Российская Федерация

Результаты. Модификация существующего алгоритма, применяемого в расчетах систем с односторонними связями, позволила без зацикливаний и за меньшее число итерации достигать необходимого результата, что демонстрирует эффективность разработанного программного продукта.

Заключение. В данном исследовании были рассмотрены проблема расчета стержневых систем с односторонними связями и алгоритмы, которые не способны рассчитывать определенный класс задач, приводящие к зацикливанию процесса расчета сложных строительных конструкций либо выполняющие эти расчеты за колоссальное количество итераций. Была предложена модификация существующего итерационного алгоритма и реализующего его программного средства, которое позволит инженерам быстрее выполнять верификацию расчётов стержневых систем с односторонними связями, полученных с помощью других программных средств.

Ключевые слова: односторонние связи; итерационный алгоритм; системы линейных алгебраических уравнений; метод конечных элементов; реакции в опоре; реакция; узел.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №18-41-340008 «Разработка математических моделей, алгоритмов и программных средств для исследования конструктивно-нелинейного поведения строительных конструкций, на основе МКЭ в форме классического смешанного метода».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Модификация алгоритма расчета конструктивно-нелинейных систем с односторонними связями / В. В. Гилка, А. В. Чумаков, Окороджи Дюк Филип Чике, А. С., Кузнецова, Ю. А. Качанов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 24–39.

Поступила в редакцию 30.03.2020

Подписана в печать 29.04.2020

Опубликована 25.05.2020

### Modification of the Algorithm for Calculation of Constructually **Nonlinear Systems with One-Way Connections**

Vadim V. Gilka<sup>1</sup>, Artem V. Chumakov<sup>1</sup>, Okoroji Duke Philip Chike<sup>1</sup>, Agnessa S. Kuznetsova<sup>1</sup> ⋈, Yurii A. Kachanov<sup>1</sup>

1 Volgograd State Technical University (VSTU) V. I. Lenina ave. 28, Volgograd 400005, Russian Federation

e-mail: agnessakyz@yandex.ru

### **Abstract**

The purpose of the research is to create an algorithm of a software module for the analysis of one-way connected and complex building structures, based on the classical mixed form (CMF) finite element methods, which improve the efficiency, reliability and quality of calculations.

Methods. If we turn to the field of structural mechanics, then the final element of the structure under consideration acts as an object of influence. At a certain nodal point of the finite element mesh, a single action (kinematic, force, etc.) is used and responses to this action are performed at all nodes on the finite element contour. These responses will also be both force and deformation.

The table of received responses is compiled according to the principle that is used to form the stiffness of the matrix (reactions) in the traditional FEM and is referred to as the finite element (FE) response matrix. The use of this FE response matrix makes it possible to algorithmize calculations by FEM in the classical mixed form as productively as in the classical finite element method in displacements.

The method, which implements the response matrix for the structure and the system of resolving equations, is arranged according to the same principles as the classical finite element method in displacements.

The method, which implements the response matrix for the structure and the system of resolving equations, is structured according to the same principles as the classical finite element method in displacements.

The result of this calculation is both displacements and forces at the nodal points of the finite element mesh.

The FE method in the classical form of the mixed type presented by the authors makes it possible to perform calculations with the same degree of convenience of algorithmization and formalization as the generally accepted finite element method in displacements.

The proposed form of FEM is free of some of the significant disadvantages of the traditional FEM.

The accuracy of the general scientific results lies in the correct and well-formed formulation within the framework of traditional methods of structural mechanics, the calculation of complex bar structures, as well as the use of the same principles, methods and comparison of the results of the solved test problems with the data obtained on the basis of traditional methods of FEM and method of displacement.

**Results.** Modification of the existing algorithm used in the calculations of systems with one-way connections made it possible to achieve the required result without loops and in a smaller number of iterations, which demonstrates the effectiveness of the developed software product.

**Conclusion.** This study considered the problem of calculating rod systems with one-sided and algorithms that are not capable of calculating a certain class of problems and leading to a looping process of calculating complex building structures, or performing these calculations for a colossal number of iterations. A modification of the existing iterative algorithm and the software that implements it was proposed, which will allow engineers to more quickly verify the calculations of rod systems with one-way connections obtained using other software tools.

**Keywords:** one-way connections; iterative algorithm; systems of linear algebraic equations; finite element method; reactions in support; reaction; node.

**With the support of.** The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of project No. 18-41-340008 "Development of mathematical models, algorithms and software for the study of constructive-nonlinear behavior of building structures, based on the FEM in the form of a classical mixed method."

**Conflict of interest.** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Gilka V. V., Chumakov A. V., Okoroji Duke Philip Chike, Kuznetsova A. S., Kachanov Yu. A. Modification of the Algorithm for Calculation of Constructually Nonlinear Systems with One-Way Connections. *Izvesti-ya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(2): 24–39. (In Russ.)

Received 30.03.2020 Accepted 29.04.2020 Published 25.05.2020

### Введение

С появлением высокопроизводительных ЭВМ стало возможным применение численных методов расчетов, требующих больших вычислительных мощностей. Таким методом является

метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ является наиболее популярным методом, использующимся в строительной механике. Это обусловлено рядом его преимуществ: универсальность – конструкции могут иметь лю-

бую форму и состоять из разных материалов; вариативность плотности вычислительной сетки — это позволяет регулировать точность вычислений в различных местах конструкции; достаточный для автоматизации уровень формализации и т. д.

Имеющиеся программные комплексы реализуют МКЭ в перемещениях. Тем не менее имеющаяся форма метода конечных элементов в перемещениях, на которой разработано множество программных средств, наряду с преимуществами имеет и множество недостатков, а также большой ряд не до конца разрешенных проблем. Это делает необходимым произведения проверки полученных данных, основываясь на результаты расчетов.

В реальное время, чтобы произвести расчет систем с односторонними связями, нередко применяются способы нелинейного и линейного программирования [1; 2; 3; 4]

Чаще всего в расчетах используется естественный метод [5], суть которого заключается в наборе итераций, где на каждом шаге исключаются связи с неприемлемыми усилиями, полученными на предыдущих итерационных шагах. Этот способ разрешает высчитать только наименее большие и малые конструкции. Несмотря на то, что собственно данный способ нередко используется при решении задач конструктивной нелинейности, он не позволяет обеспечить необходимый уровень сходимости, а также в процессе расчета может приводить к зацикливанию работы алгоритма, в результате чего решение не может быть найденным, как и путь к конечной правильной схеме.

Еще нередко используется в решении сложных задач расчета строительных конструкций численно итерационный метод [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12].

Данный алгоритм основан на модифицированном методе компенсирующих нагрузок, который требуют колоссального количества итераций при поиске решения (от 2400 до 30 000), собственно, что считается в высшей степени неэффективной методикой расчета [13; 14; 15].

Если взять за основу классическую смешанную форму метода, развиваемую авторами, и применить расчетную схему МКЭ со смешанными неизвестными, то это может позволить решить множество проблем.

### Материалы и методы

Исходный код программы был реализован при помощи языка программирования С#. Интерфейс разрабатывался с применением технологии Windows Forms [16], которая является неотъемлемой частью Microsoft.NET Framework. Выбор каждой технологий был основан на следующих преимуществах:

- полная совместимость с платформой Windows;
- высокая скорость разработки графических пользовательских интерфей-COB;

- наличие большого количества библиотек, обладающих рядом преимуществ;
- возможность с помощью платформы Mono переносить проект на другие платформы.

Исходя из требований к программному средству были выработаны следующие необходимые требования к математической библиотеке:

- содержит в себе колоссальное множество методов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ);
  - поддержка разреженных матриц;
- наличие функций для работы с матрицами: умножение, сложение, нахождение определителя, числа обусловленности, транспонирование и т. д.;
  - бесплатное использование.

Преимуществами библиотеки будуг:

- удобство использования;
- подробная документация;
- быстродействие, например наличие провайдеров для библиотек математических вычислений низкого уровня, таких как CUDA, Intel MKL, OpenBLAS и др.

На основаниях ранее указанных требований для сравнения были выбраны следующие математические библиотеки:

- Math.NET Numerics;
- ALGLIB;
- Accord .net.

Библиотека Math.NET Numerics предоставляет методы и алгоритмы для

численных вычислений в науке, технике и повседневных задачах. Она включает в себя методы для работы со специальными функциями, линейной алгеброй, случайными числами, вероятностными моделями, интеграцией, интерполяцией, регрессией, проблемами оптимизации и другими. Библиотека является бесплатной.

Преимуществом библиотеки является множество методов решений СЛАУ и поддержка работы с разреженными матрицами. Также Math.NET Numerics имеет интерфейсы для работы с библиотеками низкого уровня Intel MKL и CUDA.

ALGLIB – кросс-платформенная библиотека обработки данных и численного анализа.

Данная библиотека содержит в себе некоторые языки программирования (такие, как C++, C#, Delphi) и некоторые типы операционных систем (POSIX, Windows и Linux). Функции ALGLIB:

- интерполяция и линейный / нелинейный метод наименьших квадратов;
- оптимизация и нелинейные решатели;
- анализ данных (классификация / регрессия, статистика);
- быстрое преобразование Фурье и многие другие алгоритмы.

Библиотека ALGLIB имеет бесплатную лицензию. Она поддерживает все необходимые для разработки функции, но уступает Math.NET Numerics по удобству использования.

Accord.NET - библиотека, предоставляющая методы для статистического анализа, машинного обучения, обработки изображений и методы компьютерного зрения для приложений. Она состоит из трех основных модулей, перечисленных ниже:

- 1) обработка сигналов и изображений:
  - 2) научные вычисления;

3) вспомогательный модуль.

Accord.NET не предоставляет возможность использования разреженных матриц и интерфейсы для работы с библиотеками низкого уровня, что делает её непригодной для использования в разрабатываемом программном средстве [17].

Результат библиотек сравнения описан ниже (табл. 1).

Таблица 1. Результат сравнения библиотек **Table 1**. Library comparison result

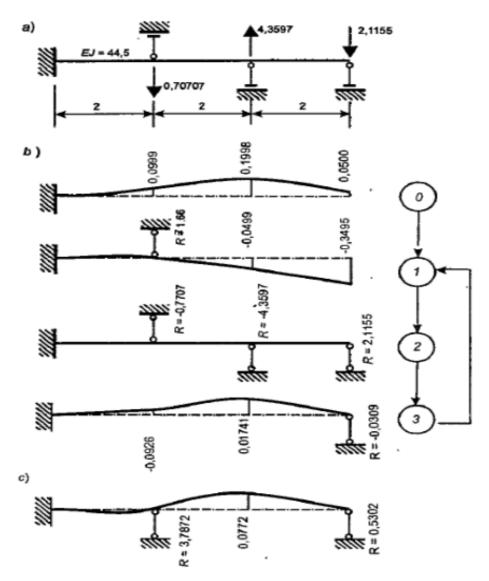
Поположи	Библиотеки			
Параметр	Math.NET Numerics	ALGLIB	Accord .net	
Необходимый функционал	+	+	-	
Бесплатная лицензия	+	+	+	
Документированность	+	+	+	
Удобство использования	+	+/-	+	
Работа с библиотеками низкого уровня	CUDA, Intel MKL	Intel MKL	-	

Далее нами за основу был взят сформулированный еще более 50 лет назад для всей теории систем с односторонними связями алгоритм Рабиновича. Данный алгоритм базируется на методе конечных элементов в классической смешанной форме и предоставляет ряд преимуществ при наблюдении за поведением системы в ряде ситуаций, таких как изменение типа влияния на неё и редактирование параметров системы [18].

Данный метод широко применяется в расчетах таких задач, и он не гарантирует сходимость расчетной схемы и может приводить к зацикливанию процесса показанной на простом примере в соответствии с рисунком 1.

Последовательность расчетных состояний для этого примера такова, что через четыре итерации процесс зацикливается [19].

Несмотря на то, что итерационный алгоритм Рабиновича может приводить к зацикливанию процесса, именно его модификация позволит получить точное решение при минимальных вычислительных затратах.



**Рис. 1**. Процесс уточнения рабочей системы: а – рассчитываемая схема; b – последовательность проверяемых состояний; с — точное решение

Fig. 1. The process of specifying a production system: a – calculated scheme;b – sequence of tested states; c – exact solution

Начальный метод расчета сложных строительных конструкций и стержневых систем, которые содержат в себе односторонние связи, можно представить следующим образом:

1. Рассматривается система, в которой все связи сняты. К этой системе прикладываются нагрузки  $P_i$ .

- 2. Выполняется оценка величин и направлений перемещений узлов, соответствующих односторонним связям:
- выбираются все узлы, в которых величины перемещений не совпадают с рабочим и превышают величину зазора;
- в этих узлах вводятся двухсторонние связи.

- 3. Выполняется расчет стержневой системы с расчетной схемой, полученной предыдущем шаге.
- 4. Производится оценка направленности реакций и величин амплитуд односторонних связей, которые остались и их дальнейшее преобразование в двухсторонние:
- выбор падает на те связи, где не произошло совпадение направления реакций с рабочим;
- далее, одна из связей, которая была найдена в расчетной схеме, становится односторонней, если в ней амплитуда реакции по абсолютной величине максимальна.
- 5. Производится оценка соответствующих односторонним связям направлений смещения узлов:
- отбираются узлы, значения смещений которых не совпадаю с рабочими и превышают размер зазора;
- вводится двухсторонняя связь в данных узлах.
- 6. В случае если направленности реакций односторонних связей соответствуют рабочим направлениям и значениям передвижения узлов, соответствующих односторонним связям, не приводят к их подключению, то работа алгоритма завершается. Схема расчета текущей фазы нагружения найдена. Иначе необходимо выполнить алгоритм начиная с шага 3 [20].

В реализованном программном модуле физическая модель системы позволяет описывать геометрию конструк-

ции, параметры односторонних опор (промежуток между конструкцией и опорой, жесткость опор и направления их работы), расположение и размер давящей на нее силы.

На базе данной модели организуются надлежащие им расчетные схемы для каждой фазы давящей силы. Значение ступени давящей силы принимается малой, и для поиска рабочей схемы необходимо малое количество итераций, которые не приводят к зацикливанию процесса итераций.

После каждой итерации результаты анализируются и обрабатываются значения реакций и их движения в направление зазоров. Если величина реакций совпадает с рабочим направлением расчетной схемы, то это соединение принимается в качестве основного для дальнейшего расчета системы на следующем итерационном шаге. Если движение в направлении существующего зазора невелико, то на следующем итерационном шаге результирующая расчетная схема будет неизменной в этой точке. В противном случае необходимо исключить анализируемый узел из расчетной схемы или установленные в нем соединения.

Рабочая схема будет истинной, если при каждом последующем шаге расчетные схемы будут совпадать на k-й и k+1 итерациях, вследствие чего вы сможете следить за рабочим процессом и изменениями, протекающими в нем во время пошагового догружения.

В программном модуле имеется возможность запустить и проанализировать систему шаг за шагом, используя опцию пошагового догружения.

Эта функция позволяет сравнивать производительность алгоритмов, использующих различные типы структур, а затем давать пользователю соответствующие рекомендации по их применению.

Метод расчета конструкции с заданной упругой односторонней зависимостью включает в себя следующие шаги:

- 2. Все связи, которые содержат в себе односторонние соединения, принимаются как двухсторонние, и расчет выполняется со следующими нагрузками:  $P_i^{(1)} = \Delta P_i$ .
- 3. Производится оценка значений и направлений реакций в преобразованных связях:
- выбор падает на те соединения,
   где направленности реакций не будут иметь совпадений с рабочими;
- та, в свою очередь, становится односторонней в расчетной схеме в месте, где полученное значение реакции максимально по абсолютной величине.
- 4. Производится расчет конструкции с полученной расчетной схемой,

- которая была получена на предыдущем шаге итераций.
- 5. Оцениваются значения и направления реакций в оставшихся односторонних связях, преобразованных в двухсторонние:
- выбрать все соединения, в которых направления реакции не совпадают с рабочими;
- та из представленных связей, где значение реакции максимальное по абсолютной величине, становится односторонней в расчетной схеме.
- 6. Выполняется оценка значений и направления движения узлов, соответствующих односторонним связям:
- выбираются все узлы, где значения смещения не совпадают с рабочим и превышают значение зазора;
- двусторонняя связь вводится на узле, для которого это значение является максимальным.
- 7. Если во всех односторонних связях, преобразованных в двухсторонние, которые остались, направления реакций будут совпадать с рабочими и значения передвижения узлов, соответствующих односторонним связям, не приводят к их включению в работу, то расчет завершается на текущем шаге нагружения.
- 8. Производится увеличение давящей силы:  $P_i^{(k)} = k \cdot \Delta P_i$ , (k=2..n), и алгоритм будет повторять начиная с шага 4.

### Результаты и их обсуждение

В качестве тестового примера был произведен расчет консольного стержня с жесткостью на изгиб  $EI = 44,5 \text{ т/м}^2$ и бесконечно жесткими односторонними опорами, с заранее известным численным решением представленного (рис. 2) с применением

многофункционального программного комплекса, при помощи которого производят расчеты и проектируют строительные конструкции ПК ЛИРА-САПР и также произведено аналитическое решение данной системы.

На первом шаге нагружения были получены результаты, которые представлены (табл. 2).

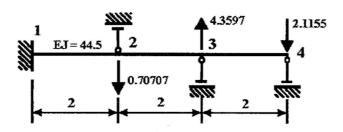


Рис. 2. Консольный стержень

Fig. 2. Cantilever rod

Таблица 2. Первый шаг нагружения

**Table 2**. First loading step

Показатель	Номера узлов			
Показатель	2	3	4	
Статусы опоры	рабочее	рабочее	рабочее	
Знак перемещения в «рабочем направлении»	-	+	+	
Перемещение узлов, м	0	0	0	
Знак реакции в «рабочем направлении»	-	+	+	
Реакции в опорах, т	0,070707	-0,43597	0,21155	

Анализ полученных значений в преобразованных односторонних связях в двухсторонние показал отсутствие совпадений направлений реакций с рабочими во 2-м и 3-м узлах, а значение амплитуды в 3-й связи максимально по абсолютной величине и принимается за одностороннюю в расчетной схеме.

После второй итерации были получены следующие результаты, представленные в таблице 3.

Аналогичным образом происходит выполнение расчета на следующих шагах догружения. При этом расчетная схема остается неизменной.

На последнем шаге догружения, после первой итерации получили ре-

зультаты, которые представлены ниже (табл. 4).

**Таблица 3**. Второй шаг нагружения **Table 3**. Second loading step

Показатель	Номера узлов			
Показатель	2	3	4	
Статусы опоры	рабочее	нерабочее	рабочее	
Знак перемещения в «рабочем направлении»	-	+	+	
Перемещение узла, м	0	0,0077189	0	
Знак реакции в «рабочем направлении»	-	+	+	
Реакция в опоре, т	-0,3850798	0	0,0530155	

**Таблица 4**. Десятый шаг нагружения **Table 4**. The Tenth step of loading

Показатель	Номера узлов			
Показатель	2	3	4	
Статус опоры	рабочее	нерабочее	рабочее	
Знак перемещения в «рабочем направлении»	-	+	+	
Перемещение узла, м	0	0,0771891	0	
Знак реакции в «рабочем направлении»	-	+	+	
Реакция в опоре, т	-3,8507982	0	0,5301545	

Направления реакций и анализ величин, преобразованных с односторонних связей в двухсторонние, демонстрирует, что направления реакций в оставшихся односторонних связях в двухсторонние совпали с рабочими и величины перемещений узлов, которые соответствуют односторонним связям, не приходят к включению в работу. Расчет на текущем шаге нагружения считается оконченным. Расчетная схема найдена.

В таблице 5 представлены результаты расчета в ПК ЛИРА-САПР, анали-

тическое решение в зависимости от количества итераций.

Расчет балок с односторонними связями с зазорами или без них по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода выполняется по одному алгоритму, приводящему к результатам, совпадающим с результатами, полученными другими методами за меньшее число итераций, иллюстрируя эффективность предложенного алгоритма расчета. Результаты работы программы и ЛИРА-САПР представлены ниже (рис. 3, 4).

### Таблица 5. Сравнительная таблица

Table 5. Comparison table

Показа-	Аналитическое решение	ЛИРА-САПР (итераций)			КСФ МКЭ (10 ша-
тель	Аналитическое решение	2400	10000	30000	гов догружения, )
<i>R</i> <sub>2</sub> , т	-3,7872	-3,83	-3,795	-3,7871	-3,8508
<i>R</i> <sub>4</sub> , т	0,5302	0,52	0,527	0,5301	0,5302
Z <sub>3</sub> , м	0,0772	0,0778	0,0773	0,7772	0,0772

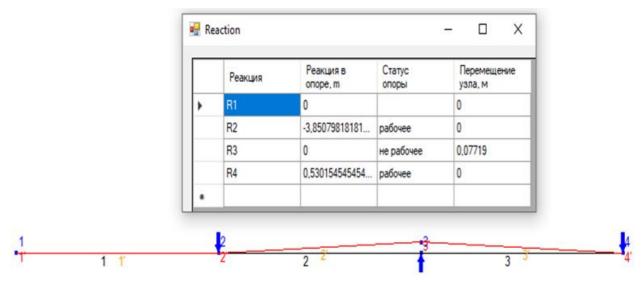


Рис. 3. Результаты работы программы

Fig. 3. Results of the program

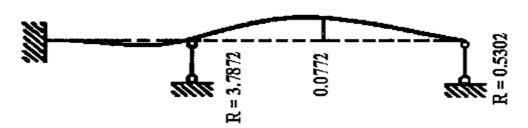


Рис. 4. Результаты работы ЛИРА-САПР

Fig. 4. Results of LIRA-CAD work

Главные преимущества модифицированного метода расчета стержневых систем с односторонними связями заключается в том, что процесс конечного результата достигается за меньшее количество проводимых алгоритмом итераций без зацикливания итерационного процесса и в предоставлении широкой информации о НДС системы на каждом шаге нагружения. Также модификация метода помогает отслеживать включения и выключения

односторонних связей как в пошаговом процессе, так и при изменении мощности нагрузки и последовательности её приложения.

### Выводы

В данной работе были рассмотрены проблема расчета стержневых систем с односторонними связями и алгоритмы, которые не способны рассчитывать определенный класс задач, приводящие к зацикливанию процесса расчета сложных строительных конструкций либо выполняющие эти расчеты за колоссальное количество итераций.

Цель данной работы заключалась в повышении эффективности расчетов

строительных конструкций с односторонними связями за счет модификации существующего итерационного алгоритма и реализующего его программного средства, которое позволит инженерам быстрее выполнять верификацию расчётов стержневых систем с односторонними связями, полученных с помощью других программных средств. В результате тестирования модифицированный исходный алгоритм позволил без зацикливаний и за меньшее число итерации достигать необходимого результата, что демонстрирует эффективность разработанного программного продукта.

### Список литературы

- 1. Палий И. А. Линейное программирование: учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 175 с.
- 2. Бирюкова Л. Г., Сагитов Р. В. Линейная алгебра и линейное программирование: учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 53 с.
- 3. Мунасыпов Н. А. Линейное программирование: учеб. пособие. Оренбург: Пресса, 2015. 122 с.
- 4. Агальцов В. П. Математические методы в программировании: учебник. М.: ФОРУМ, 2015. 240 с.
- 5. Калиткин Н. Н., Алыпина Е. А. Численные методы: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Академия, 2013. 304 с.
- 6. Зенков А. В. Численные методы: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. унта, 2016. 124 с.
- 7. Быченков Ю. В., Чижонков Е. В. Итерационные методы решения седловых задач. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 249 с.
- 8. Рейзлин В. И. Численные методы оптимизации: учеб. пособие / Томский политехнический университет. Томск, 2011. 105 с.
- 9. Фаддев М. А., Марков К. А. Численные методы: учеб. пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. 158 с.
- 10. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. 9-е изд. М.: Лаборатория знаний, 2020. 636 с.

- 11. Жевнеров В. А. Методы оптимизации больших систем: монография. М.: РУСАЙНС, 2020. 120 с.
- 12. Тухфатуллин Б. А. Численные методы расчёта строительных конструкций: учеб. пособие / Том. гос. архит.-строит. ун-т. Томск, 2017. 100 с.
- 13. Верификационный отчет по программному комплексу ЛИРА-САПР. URL: http://www./ira/and.ru>/ira/verif/repory.pdf (дата обращения: 10.03.2020).
- 14. Нелинейная строительная механика стержневых систем. Основы теории. Примеры расчета / В. А. Игнатьев, А. В. Игнатьев, В. В. Галишникова, Е. В. Онищенко; Волгоград. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград, 2014. 97 с.
- 15. Игнатьев А. В. Математическая модель и алгоритмы динамического расчёта конструкций по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Известия ВолгГТУ. Сер.: Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. 2018. № 5 (215). С. 22-26.
  - 16. Ватсон Б. С#4.0 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
- 17. Скит Дж. С# программирование для профессионалов. 2-е изд. М.: Вильямс, 2011. 544 с.
- 18. Игнатьев А. В., Игнатьев В. А., Бочков М. И. Расчёт многопролётных балок с односторонними связями по МКЭ в форме классического смешанного метода // Вестник Волгоградского государственного архитектурного-строительного университетата. Сер.: Строительство и архитектура. 2017. № 48 (67). С. 94-108.
- 19. Игнатьев А. В., Игнатьев В. А., Онищенко Е. В. Решение геометрически нелинейных задач статики шарнирно-стержневых систем на основе метода конечных элементов в форме классического смешанного метода // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 20-33.
- 20. Игнатьев А. В., Чумаков А. В., Гилка В. В. Моделирование неполной алгебраической проблемы собственных значений и векторов методом частотно-динамической конденсации на основе МКЭ в форме классического смешанного метода // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15, № 1. С. 62-68.

#### Reference

- 1. Paliy I. A. Lineinoe programmirovanie: ucheb. posobie dlya akademicheskogo bakalavriata [Linear programming: textbook, manual for academic undergraduate]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 175 p. (In Russ.)
- 2. Biryukova L. G., Sagitov R. V. Lineinaya algebra i lineinoe programmirovanie [Linear algebra and linear programming]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 53 p. (In Russ.)
- 3. Munasypov N. A. Lineinoe programmirovanie [Linear programming]. Orenburg, Press Publ., 2015. 122 p. (In Russ.)
- 4. Agaltsov V. P. Matematicheskie metody v programmirovanii [Mathematical methods in programming]. Moscow, FORUM Publ., 2015. 240 p. (In Russ.)
- 5. Kalitkin N. N., Alypina E. A. Chislennye metody [Numerical methods]. Moscow, Academy Publ., 2013. 304 p. (In Russ.)

- 6. Zenkov A. V. Chislennye metody [Numerical methods]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 124 p. (In Russ.)
- 7. Bychenkov Yu. V., Chizhonkov E. V. Iteratsionnye metody resheniya sedlovykh zadach [Iterative methods for solving saddle problems]. Moscow, BINOM. Knowledge Laboratory Publ., 2010. 249 p. (In Russ.)
- 8. Reizlin V. I. Chislennye metody optimizatsii: ucheb. posobie [Numerical optimization methods: tutorial]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 105 p. (In Russ.)
- 9. Faddev M. A., Markov K. A. Chislennye metody [Numerical methods]. N. Novgorod, Nizhny Novgorod State University Publ., 2010. 158 p. (In Russ.)
- 10. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobelkov G. M. Chislennye metody [Numerical methods]. 9<sup>th</sup> ed. Moscow, Laboratory of Knowledge Publ., 2020. 636 p. (In Russ.)
- 11. Zhevnerov V. A. Metody optimizatsii bol'shikh sistem [Optimization methods for large systems]. Moscow, RUSAYNS Publ., 2020. 120 p. (In Russ.)
- 12. Tukhfatullin B. A. Chislennye metody rascheta stroitel'nykh konstruktsii [Numerical methods for calculating building structures]. Tomsk, Tomsk State Architectural and Construction University Publ., 2017. 100 p. (In Russ.)
- 13. Verification report on the LIRA-SAPR. (In Russ.) Available at: http://www./ira/and.ru>/ira/verif/repory.pdf. (accessed 10.03.2020)
- 14. Ignatiev V. A., Ignatiev A. V., Galishnikova V. V., Onishchenko E. V. Nelineinaya stroitel'naya mekhanika sterzhnevykh sistem. Osnovy teorii. Primery rascheta [Nonlinear structural mechanics of rod systems. Foundations of the theory. Calculation examples]. Volgograd, Volgograd. State Archit.- Builds. Un-t Publ., 2014. 97 p. (In Russ.)
- 15. Ignatiev A. V. Matematicheskaya model' i algoritmy dinamicheskogo rascheta konstruktsii po metodu konechnykh elementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda [Mathematical model and algorithms for dynamic analysis of structures by the finite element method in the form of a classical mixed method]. *Izvestiya VolgGTU. Ser.: Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noi tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh = Izvestiya VolgSTU. Ser.: Actual problems of control, computer technology and informatics in technical systems,* 2018, no. 5 (215), pp. 22-26. (In Russ.)
- 16. Watson B. S#4.0 na primerakh [C # 4.0 by examples]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011. 608 p. (In Russ.)
- 17. Skeet J. C# programmirovanie dlya professionalov [C # programming for professionals]. 2<sup>th</sup> ed. Moscow, Williams Publ., 2011. 544 p. (In Russ.)
- 18. Ignatiev A. V., Ignat'ev V. A., Bochkov M. I. Raschet mnogoproletnykh balok s odnostoronnimi svyazyami po MKE v forme klassicheskogo smeshannogo metoda [Calculation of multi-span beams with one-sided ties by FEM in the form of the classical mixed method]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturnogo-stroitelnogo universitetata. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura = Vestn. Volgogr. State Architect-Build Un-That. Ser. Construction and architecture, 2017, no. 48 (67), pp. 94-108. (In Russ.)
- 19. Ignatiev A. V., Ignatiev V. A., Onishchenko E. V. Reshenie geometricheski nelineinykh zadach statiki sharnirno-sterzhnevykh sistem na osnove metoda konechnykh elementov v forme

klassicheskogo smeshannogo metoda [Solution of geometrically nonlinear problems of statics of hinge-rod systems based on the finite element method in the form of a classical mixed method]. MGSU Bulletin = Vestnik MGSU, 2016, no. 2, pp. 20-33. (In Russ.)

20. Ignatiev A. V., Chumakov A. V., Gilka V. V. Modelirovanie nepolnoi algebraicheskoi problemy sobstvennykh znachenii i vektorov metodom chastotno-dinamicheskoi kondensatsii na osnove MKE v forme klassicheskogo smeshannogo metoda [Modeling of an incomplete algebraic problem of eigenvalues and vectors by the method of frequencydynamic condensation based on FEM in the form of a classical mixed method]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsii i sooruzhenii = Construction mechanics of engineering structures and structures, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 62-68. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the Authors

Гилка Вадим Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация e-mail: gilka vv@mail.ru

Чумаков Артем Владимирович, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

e-mail: chumakovtema@gmail.com

Окороджи Дюк Филип Чике, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация e-mail: dukechike007@gmail.com

Кузнецова Агнесса Сергеевна, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Качанов Юрий Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация e-mail: yura 1234@mail.ru

Vadim V. Gilka, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: gilka vv@mail.ru

Artem V. Chumakov, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: chumakovtema@gmail.com

Okoroji Duke Philip Chike, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

e-mail: dukechike007@gmail.com

Agnessa S. Kuznetsova, Senior Lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Yurii A. Kachanov, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: yura 1234@mail.ru

#### Оригинальная статья / Original article

УДК 629.7.08

## Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов

С. А. Тяпкин $^{1}$ , И. Е. Мухин $^{2}$ , Д. С. Коптев $^{2}$   $\boxtimes$ 

□ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

#### Резюме

**Целью исследования** является анализ существующих методов и определение возможных путей повышения эффективности диагностирования двигателей летательных аппаратов, а также разработка решения по прогнозированию ресурса авиационных двигателей, усовершенствованию системы их технического обслуживания.

**Методы.** Современные методы диагностирования авиационных двигателей обладают существенным недостатком — невозможностью прогнозирования отказа минимум за 5-8 полетов и громоздкостью оборудования. Разработка нетрадиционных методов, лишенных перечисленных недостатков, становится возможной только при проведении дополнительного анализа характеристик вибросигналов. Дополнительный анализ возможен в новом признаковом пространстве, более чувствительном к тренду старения авиационных двигателей. На практике наибольшее распространение получила корреляционная размерность, для оценки которой используется алгоритм Грасбергера-Прокаччио.

**Результаты.** В данной статье введен принципиально новый параметр — показатель структуры вибросигнала, позволяющий прогнозировать выход из строя подшипников авиационных двигателей минимум за 6-8 последующих полётов летательных аппаратов. Вычисление данного параметра базируется на вычислении корреляционной размерности вибросигнала отдельных полётов. Учет этого показателя дает возможность более полно отражать процессы, происходящие в двигателе при изменении его технического состояния. При этом он характеризуется разной чувствительностью к изменению вибросостояния авиационного двигателя.

Заключение. Диагностический контроль двигателей семейства АЛ-31Ф осуществляется совокупностью методов, в которой основную роль играют виброакустический, механические проверки момента расцепления и биения роторов, анализ масла на посторонние включения и химический состав. Перечисленные методы диагностики двигателей позволяют в лучшем случае спрогнозировать возможный дефект максимум за два полета, что является явно недостаточным для безопасной эксплуатации.

На сегодняшний день весьма актуальна разработка методов диагностирования, которые путём обработки полётных данных, с заданными показателями вероятности пропуска и ложного дефекта имеют время прогноза не менее одного полётного дня (4...5 полётов) и трудозатраты не ниже 0,1 челичас на ПК.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК») пр. Буденного 16, г. Москва 121357, Российская Федерация

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>©</sup> Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С., 2020

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; межроторный подшипник; межваловый подшипник; вибросигнал; нелинейная динамика; корреляционный интеграл; корреляционная размерность; система диагностирования; отказ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 40–56.

Поступила в редакцию 26.03.2020

Подписана в печать 20.04.2020

Опубликована 25.05.2020

## Analysis of the Existing Methods and Possible Ways to Increase The Effectiveness of the Diagnostic System for Aircraft Engines

## Sergey A. Tyapkin<sup>1</sup>, Ivan E. Mukhin<sup>2</sup>, Dmitry S. Koptev<sup>2</sup> ⊠

≥ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

#### **Abstract**

The purpose of the research is to analyze existing methods and determine possible ways to improve the efficiency of diagnosing aircraft engines, as well as develop solutions for predicting the life of aircraft engines, improve their maintenance systems.

Methods. Modern methods for diagnosing aircraft engines have a significant drawback - the inability to predict a possible failure for at least 5-8 flights and the bulkiness of the equipment. The development of new non-traditional methods, devoid of the above disadvantages becomes possible only when conducting an additional analysis of the characteristics of vibration signals. Additional analysis is possible in a new feature space, more sensitive to the aging trend of aircraft engines. In practice, the most widely used correlation dimension, to evaluate which the Grasberger -Proccaccio algorithm.

Results. This article introduces a fundamentally new parameter called the vibration signal structure indicator, which allows predicting the failure of aircraft engine bearings for at least 6-8 subsequent flights of aircraft. The calculation of this parameter is based on the analogy of calculating the correlation dimension of the vibration signal of individual flights. Taking this indicator into account makes it possible to more fully reflect the processes occurring in the engine when its technical condition changes. Moreover, at different delay times τ, it characterizes different sensitivity to changes in the vibration state of the aircraft engine.

Conclusion. Diagnostic control of engines of the AL-31F family is carried out by a set of methods in which the main role is played by vibroacoustic, mechanical checks of the moment of disengagement and runout of the rotors, analysis of oil for foreign matter and chemical composition. The listed methods of engine diagnostics allow, at best, to predict a possible defect in a maximum of two flights, which is clearly insufficient for safe operation. Today, it is very relevant to develop diagnostic methods that, by processing flight data, with given indicators of the probability of

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> JSC "United Engine Corporation" Budennogo pr. 16, Moscow 121357, Russian Federation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

skipping and false defect, would have a forecast time of at least one flight day (4 ... 5 flights) and labor costs of at least 0.1 person-hour PC.

**Keywords:** aircraft engine; inter-rotor bearing; inter-shaft bearing; vibration signal; nonlinear dynamics; correlation integral; correlation dimension; diagnostic system; failure.

**Conflict of interest.** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Analysis of the Existing Methods and Possible Ways to Increase The Effectiveness of the Diagnostic System for Aircraft Engines. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. *Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020; 10(2): 40–56. (In Russ.)

Received 26.03.2020

Accepted 20.04.2020

Published 25.05.2020

\*\*\*

#### Введение

Авиационный двигатель является ключевым звеном любого летательного аппарата, определяя его летнотехнические характеристики, безопасность, надежность, экономичность и стоимость эксплуатации. Современный авиадвигатель (АД) является сложной системой, состоящей из взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов [1]:

- высокоэффективный вентилятор, малоступенчатый компрессор низкого давления, высоконагруженный высоко-эффективный компрессор высокого давления, малоэмиссионная камера сгорания, высокотемпературная турбина высокого давления, турбина низкого давления из керамического композиционного материала, планетарный редуктор мощностью 30...60 МВ;
- электроприводные агрегаты топливной и масляной систем, гибридные или керамические подшипники каче-

ния, высокоэффективные уплотнения, регулируемое сопло наружного контура, тонкая мотогондола;

- система автоматического управления (САУ) на основе алгоритмов, оптимизирующих режимы работы двигателя, исходя из его текущего технического состояния;
- системы сбора диагностической информации (как в полете, так и на земле) для динамического управления ресурсом и оптимизации процедур осмотра и технического обслуживания.

Одними из важнейших требований к АД являются максимально возможная надежность, ремонтопригодность и возможность оперативной диагностики и прогностики остаточного ресурса на всех составляющих жизненного цикла [1].

Целью статьи является анализ существующих методов и определение возможных путей повышения эффективности диагностирования двигателей

летательных аппаратов, а также разработка решения по прогнозированию ресурса авиационных двигателей, усовершенствованию системы их технического обслуживания, снижению стоимости жизненного цикла на этапе эксплуатации.

Без нарушения общности исследований рассмотрим эти задачи на примере широко распространенного авиационного двигателя АЛ-31Ф.

Рассмотрим систему сбора диагностической информации в ходе технического обслуживания авиационного двигателя семейства АЛ-31Ф, серийно выпускаемого с 1981 г. и применяемого на самолётах типа СУ-27, СУ-30, СУ-34, CY 35, J-10, J-11, J-15, J-20.

По данным открытых источников на 2020 г. [2], эксплуатируется порядка 3000 двигателей этого семейства, из них около 900 – в ВКС РФ, 1100 – ВВС Китая, 500 – ВВС Индии, остальные – в ВВС Вьетнама (118), Алжира (116), Венесуэлы (46), Малайзии (36), Индонезии (32), Анголы (14) и Уганды (12).

#### Материалы и методы

Содержание методов контроля и диагностической информации в ходе эксплуатации двигателей семейства АЛ-31 $\Phi$  приведено ниже (рис. 1).

Их можно разделить на несколько категорий:

- параметрические методы, измеряющие уровень вибросигнала с датчи-

ка вибрации, отклонение от среднего значения на данных режимах работы, наличие тренда, скачков, выбросов и нестабильности. Их можно осуществлять вручную, автоматизированно или автоматически в зависимости от типа регулятора двигателя (аналоговый, цифровой), наличия или отсутствия в цифровом регуляторе диагностических программных модулей и наличия или отсутствия наземных программных комплексов для обработки полётных данных;

- осмотр узлов двигателя, электрических цепей и т. п.;
- проверка масляных фильтров и магнитных пробок на наличие посторонних включений («стружка в масле»);
- химический анализ масла на Fe, Cu, Mg, Si;
- виброакустический анализ при ручной прокрутке роторов двигателя;
- измерение момента расцепления роторов и биения ротора высокого давления.

При этом основной целью проводимых мероприятий является своевременное обнаружение дефектов опорных подшипников, которые для данного типа двигателя носят названия межроторного (МРП) и межвального (МВП), а также определение момента отстранения двигателя от эксплуатации.

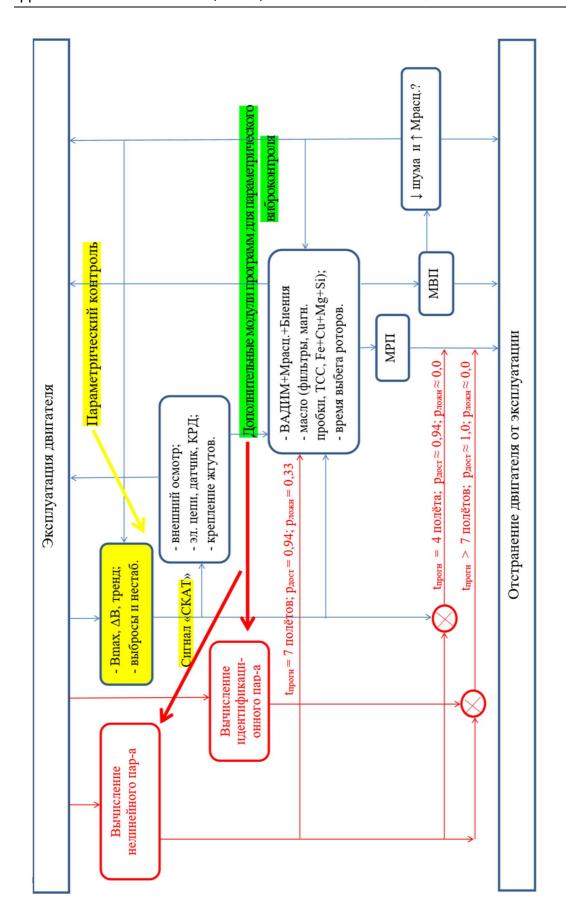


Рис. 1. Содержание мероприятий диагностического контроля межроторного и межвалового подшипников

Fig. 1. The contents of the diagnostic monitoring of inter-rotor and shaft bearings

Параметрический анализ вибросигнала в этом списке является вспомогательным средством определения состояния МРП/МВП, а основная роль в этом отношении принадлежит виброакустическому методу, механическим проверкам расцепления/биения роторов и анализу масла. Это происходит по следующим причинам:

- зачастую амплитуда вибросигнаопределяется не состоянием ла МРП/МВП, а исправностью электрических цепей, жгутов, датчика вибрации;
- отсутствием реальных признаков дефекта МРП/МВП: стружки в масле, подклинивания и биения роторов, акустических сигналов от дефектов подшипников – при наличии каких-либо замечаний к параметрам вибросигнала;
- недостаточным временем прогноза разрушения МРП/МВП при использовании параметрического метода. По имеющейся статистике в случаях отказа МРП/МВП система контроля авиационной техники «СКАТ» [3] выявляет дефект МРП в среднем за два полёта до его разрушения (включая крайний полёт, что является недостаточным), а дефект МВП – за один полёт, т. е. при обработке данных крайнего полёта (что Диагностические бесполезно). граммы цифровых регуляторов двигателя имеет примерно такой же функционал, что и «СКАТ», и обладает теми возможностями. Программы же «СКАТ» у эксплуатирующей организа-

ции может и не быть, а двигатель может быть оснащен аналоговым регулятором. В таком случае анализ вибросигнала осуществляется вручную по сигналограмме, что эффективность контроля ещё более снижает;

- снижением в последние годы числа выключений двигателей в полёте (после внедрения в производство в отношении МРП/МВП ряда улучшающих мероприятий), что снизило заинтересованность разработчиков и производителей двигателя в поиске и совершенствовании методов контроля состояния  $MP\Pi/MB\Pi$ .

Таким образом, диагностический контроль двигателей семейства АЛ-31Ф осуществляется совокупностью методов, в которой основную роль играют виброакустический, механические проверки момента расцепления и биения роторов, анализ масла на посторонние включения и химический состав. Параметрический анализ вибросигнала занимает вспомогательное место.

Таким образом, рассмотренные методы диагностики двигателей позволяют в лучшем случае спрогнозировать возможный дефект максимум за два полета, что явно недостаточно для безопасной эксплуатации.

Основные направления совершенствования системы диагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф приведены на рисунке 2.

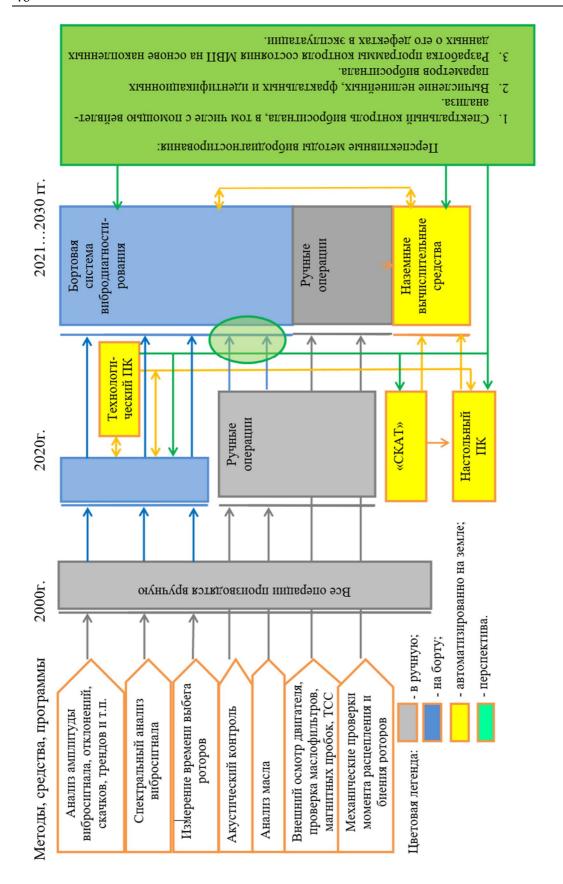


Fig. 2. Logic of the development of a system for diagnosing engines of the AL-31F family

**Рис. 2**. Логика развития системы диагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф

Данные направления включают:

- внедрение цифровых регуляторов двигателей (ЦРД) с оснащением их диагностическими функциями, которые ранее выполнялись вручную или с помощью программ анализа полётных данных, т. е. перенос диагностических функций на борт самолёта. Можно предположить, что список этих функций с течением времени будет непрерывно расширяться, например, за счет оснащения ЦРД виброакустическим каналом измерения и каналом анализа масла. В этом случае на земле останутся только внешний осмотр и мероприятия, связанные с механической прокруткой роторов;
- применение продвинутых программных комплексов для анализа полётных данных, установленных на персональный компьютер. На сегодняшний лень имеется несколько образцов устройств анализа полётных данных, технологических компьютеров для обцифровых служивания регуляторов, разработанных различными организациями с различным набором диагностических функций (сигнализация предельного уровня вибрации, анализ величины отклонения уровня вибрации от модельного значения, поиск выбросов, скачков и нестабильностей, др.) [4]. Очевидна необходимость разработки универсального устройства, объединяющего возможности всех средств, которые показаны на рисунке 2 в перспективе до 2021–2030 гг.;
- наличие потенциальной возможности использования других методов

диагностирования, таких спектральный и вейвлет-анализ вибросигнаметоды нелинейной динамики, фрактальные методы и методы идентификационных измерений. Достоинством данного направления, которое одним словом можно назвать параметрическим (или аналитическим), является его неограниченность в том смысле, что сегодня вычислительные ресурсы наземных средств практически ничем не ограничены, для бортовых средств они также велики, а при использовании на борту сетевых архитектур – практически ничем не ограничены. Следовательно, дело заключается в практической отработке научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКТР), нашедших широкого распространения (спектральный, вейвлетный) и новых (нелинейный, фрактальный, идентификационный) методов системы диагностирования.

Таким образом, в случае разработки методов диагностирования, которые путём обработки полётных данных, с заданными показателями вероятности пропуска и ложного дефекта имели бы время прогноза не хуже одного полётного дня (4-5 полётов) и трудозатраты не хуже 0,1 чел.-час на ПК (ныне 1,5 чел.-час, 2 человека в специально оборудованном помещении), ситуация с параметрическим методом контроля АЛ-31Ф существенно изменилась бы, улучшая показатели безопасности,

надежности и стоимости эксплуатации авиационного двигателя [5; 6].

В настоящее время в высокой степени готовности имеются следующие возможности решения задачи повышения эффективности системы диагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф, основанные на:

- а) анализе широкополосного спектра вибросигнала. Для его применения необходима запись вибросигнала с высокой частотой дискретизации, которую с двигателя можно снять на стоянке дистанционно с помощью лазера [4]. Для отработки метода возможно использование оборудования компании «Мера» на стендах заводов-производителей [7];
- б) применении вейвлет-анализа для диагностирования механических систем [8];
- в) применении нелинейных [9] и идентификационных [10] характеристик вибросигнала, позволяющих обнаруживать дефект, отслеживать развитие повреждения и прогнозировать момент отказа опорных подшипников с высокой достоверностью;
- г) оснащении цифровых регуляторов двигателя виброакустическим каналом диагностирования, который ныне в переносном варианте является основой системы диагностирования МРП/МВП, а также каналом анализа масла на наличие частиц [11].

Однако практически все перечисленные методы диагностирования обладают существенным недостатком – громоздкостью оборудования и невоз-

можностью прогнозирования возможного отказа минимум за 5-8 полетов. Следовательно, весьма актуальным является необходимость разработки новых нетрадиционных методов, лишенных перечисленных недостатков. этой целью необходимо провести дополнительный анализ характеристик вибросигналов. Дополнительный анализ возможен в новом признаковом пространстве, более чувствительном к тренду старения авиационных двигателей. Рассмотрим это пространство признаков в рамках нелинейной динамики, одной из характеристик которой является ее размерность.

В нелинейной динамике введено понятие размерности динамических систем, под которой понимается количество степеней свободы, порядок, число дифференциальных уравнений, необходимых для описания данной системы. В теории и практике известны следующие разновидности размерности: информационная размерность, корреляционная размерность, ёмкостная размерность и размерность Ляпунова. В пределах возможных ошибок вычисления можно считать, что они приближены друг к другу. При численном моделировании динамических систем наиболее удобно использовать размерность Ляпунова или ёмкость множества. Для оценки фрактальной размерности аттрактора по экспериментальным данным лучше всего подходит корреляционная размерность [12].

На практике наибольшее распространение получила корреляционная

размерность, для оценки которой используется алгоритм Грасбергера-Прокаччио [6], который заключается в вычислении среднего количества точек исходного вибросигнала N, расстояние между которыми не превышает некоторого значения г. При этом точки могут иметь две, три и более координат, которые получаются из одномерного вибросигнала путём его преобразовании с параметрами: n — число координат,  $\tau$  — задержка между соседними отсчетами. Для этого необходимо от каждого значения вибросигнала  $B(t_i)$  последовательно взять (n-1) отсчетов с задержкой т. Далее следует построить зависимость N от r в системе координат с двойным логарифмическим масштабом, аппроксимировать график прямой линией и найти угловой коэффициент этой линии. Эту величину, полученную при обработке преобразованного вибросигнала с конкретными значениями п и т с помощью алгоритма Грасбергера-Прокаччио [10], будем называть корреляционным интегралом  $C(n, \tau)$ .

Способ вибродиагностики газотурбинного двигателя включает в себя получение эталонного значения вибросостояния двигателя при его испытаниях, а также получение рабочего значения вибросостояния двигателя. Указанные значения получают с помощью датчика вибрации. Помимо этого, создают дефектное состояние в механической системе двигателя, снимая показания датчика вибрации при работе системы с

дефектами. При этом на эталонных, рабочих и дефектных режимах определяют показатель структуры вибросигнала Pstr – числовую характеристику вибросигнала, которую находят посредством вычисления определенного количества независимых параметров, от которых зависит вибросигнал, отражающий одну из координат газотурбинного двигателя как динамической системы. При этом оценивается параметр D, рассчитываемый при различных Е по формуле

$$D \approx \frac{\log m_{\varepsilon}}{\log \varepsilon},$$

где  $m_{\scriptscriptstyle E}$  – среднее количество точек в окрестности радиусом є от точек временного ряда, которое рассчитывают методом корреляционного интеграла [13].

Под параметром D понимается размерность вибросигнала, вычисленная с помощью корреляционного интеграла, означающая количество независимых координат (факторов), от которых зависит наблюдаемый сигнал той или иной динамической системы. В нашем случае динамической системой является газотурбинный двигатель, а одномерной наблюдаемой координатой – сигнал со штатного датчика вибрации. Для оценки *D* динамической синеобходимо последовательно стемы преобразовывать сигнал в многомерный, вплоть до 20-мерного, что в литературе [14; 15; 16] называется числом координат пространства вложения или размерностью пространства вложения, с последующим вычислением D для каждого преобразования (теорема Такенса [9; 11]). Показатель структуры принимает значение номера координаты, при которой начинается ограничение по величине D, затем анализируют изменения показателей структуры во времени и определяют техническое состояние газотурбинного двигателя.

При этом среднее число многомерных точек данных  $m_{\varepsilon}$ , находящихся в окрестности радиусом  $\varepsilon$  для каждого массива, находится путем вычисления корреляционного интеграла (алгоритм Грасбергера-Прокаччио [10]):

$$m(\varepsilon) = \lim_{m \to \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m \xi \left( \varepsilon - \left| \vec{x}_i - \vec{x}_j \right| \right),$$

где m — количество многомерных точек исходных данных;

 $\vec{x}_{i}, \vec{x}_{j}$  – координаты точек данных в многомерном пространстве; i, j=1...m;

 $\xi(\varepsilon - |x_i - x_j|)$  — функция Хевисайда, которая равна 1, если расстояние (модуль) между точками меньше  $\varepsilon$ , и 0 в противоположном случае.

Далее необходимо определить  $m(\varepsilon)$  для различных  $\varepsilon$ , отложить полученную зависимость в системе координат с двойным логарифмическим масштабом, определить на графике линейный участок и его угловой коэффициент.

При преобразовании исходного одномерного ряда данных в многомерный

(реконструкция фазового пространства методом запаздывания [15; 16; 17]) необходимо выбрать определенное время задержки между отсчетами вибросигнала (от 1 до 100). Время задержки зависит, с одной стороны, от типа газотурбинного двигателя, с другой — от параметров системы регистрации вибросигнала двигателя.

Если наблюдаемый сигнал — случайный (шум), то показатель D будет по мере увеличения числа координат разложения расти не ограничиваясь. Если же D прекращает рост, то эта величина D и соответствующая ей координата пространства вложения (названа автором показателем структуры Pstr) будут характеризовать наблюдаемую динамическую систему.

#### Результаты и их обсуждение

Размерность динамической системы D определяется путем последовательного увеличения п и вычисления корреляционного интеграла  $C(n, \tau)$  для каждого n и зафиксированного  $\tau$ . Если исследуемый процесс - случайный (шум), то  $C(n, \tau)$  с увеличением n должен возрастать теоретически не ограничиваясь. Если процесс определяется детерминированными факторами, то график зависимости C от n будет сначала возрастать, а потом войдет в насыщение. Этот уровень и будет соответствовать корреляционной размерности Dисследуемой динамической системы (рис. 3).

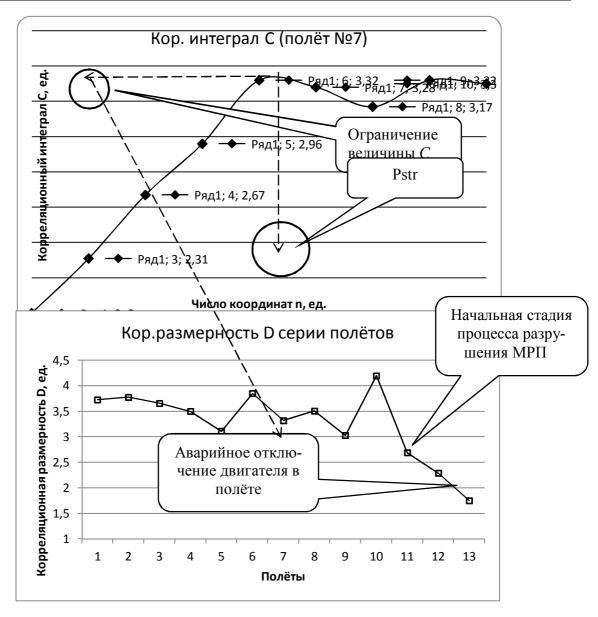


Рис. 3. Зависимость между корреляционным интегралом, корреляционной размерностью и показателем структуры

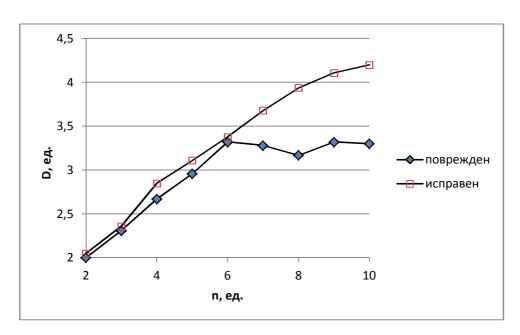
Fig. 3. Dependence between the correlation integral, correlation dimension and the structure index

Время задержки необходимо выбрать такое, при котором между двумя соседними величинами вибрации теряили ослабевает динамическая ется связь, то есть они становятся независимыми случайным величинам (или приближаются к таковым). Его можно примерно определить по автокорреляционной функции исходного сигнала, приняв равным от 1/4 до 1/2 времени до первого минимума автокорреляционной функции вибросигнала.

Исходя из вышеизложенного предлагается интегральный параметр качественного состояния авиационного двигателя – показатель структуры *Pstr*, разработанный по опыту вычисления корреляционной размерности вибросигнала отдельных полётов. Он отличается от своего прототипа D тем, что вместо корреляционного интеграла C при анализе данных используется величина n, при которой началось ограничение С. Экспериментально установлено, что этот показатель более полно отражает процессы, происходящие в двигателе при изменении его технического состояния. При этом при разных временах задержки т он обладает разной чувствительностью к изменению вибросостояния двигателя. Это свойство использовано для выбора такого значения т, при котором в большинстве экспериментальных можно было говорить о наличии дефекта.

Взаимная связь между корреляционным интегралом, корреляционной размерностью и показателем структуры показана на рисунке 3, на котором приведены графики, полученные при обработке материалов объективного контроля 13 полётов одного из бортов типа СУ-27 с аварийной остановкой двигателя по причине разрушения межроторного подшипника.

На рисунке 4 приведён типичный график корреляционной размерности D вибросигнала исправного двигателя семейства АЛ-31 $\Phi$  и двигателя с повреждённым межроторным подшипником.



**Рис. 4**. Графики корреляционной размерности D вибросигнала исправного двигателя и двигателя с дефектным межроторным подшипником

**Fig. 4**. Graphs of the correlation dimension D of the vibration signal of a working engine and a motor with a defective inter-rotor bearing

Из графика на рисунке 4 следует, что на основании этой установленной закономерности можно построить диагностическую систему, используя две возможности:

- а) по величине корреляционной размерности D;
- б) по величине числа координат n, при котором ограничивается D. Назо-

вем этот параметр показателем структуры Pstr вибросигнала.

## Выводы

Проведенный анализ методов диагностирования авиационных двигателей показал их недостаточную эффективность [18; 19; 20]. В рамках настоящей статьи разработан принципиально новый параметр, позволяющий прогнозировать выход из строя подшипников авиационных двигателей минимум за 6-8 полетов летательных аппаратов. Этот параметр называется показателем структуры

вибросигнала. Его вычисление базируется на вычислении корреляционной размерности вибросигнала отдельных полётов, однако отличается от своего прототипа тем, что вместо корреляционного интеграла C при анализе данных используется величина п, при которой начинается ограничение C. Этот показатель более полно отражает процессы, происходящие в двигателе при изменении его технического состояния. При этом при различных временах задержки т наблюдается отличие в чувствительности к изменению вибросостояния двигателя.

#### Список литературы

- 1. Гордин М. В., Палкин В. А. Концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолетов // ЦИАМ, Авиационные двигатели. 2019. № 3(4). C. 7–16.
- 2. ВВС Китая и других стран. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org (дата обращения: 03.03.2020).
- 3. Программное обеспечение «СКАТ», АО НПП «Топаз». Режим доступа: https://topazlab.ru/products/ckat-system/ (дата обращения: 03.03.2020).
- 4. Бортовые распределенные системы сбора и обработки информации при летных испытаниях. НПП «Мера». Режим доступа: http://www.nppmera.ru/ (дата обращения: 03.03.2020).
- 5. Библиотеки идентификационных алгоритмов цифровой обработки сигналов. URL: www.labview.ru/labview/algorithm/ (дата обращения: 12.03.2020).
- 6. Прибор для контроля загрязнения рабочих жидкостей гидросистем icountLCM20. URL: https://parker-store.by/files/blocks/07 (дата обращения: 14.03.2020).
- 7. Ушаков А. П. Применение лазерной вибродиагностики в процессе стендовых испытаний агрегатов авиационной техники // Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем: межвуз. темат. сб. науч. тр. СПб.: СПбГУГА, 2009. T. 11. C. 5 – 11.
- 8. Ахметханов Р. С. Применение теории фракталов и вейвлет-анализа для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем // Вестник научнотехнического развития. 2009. № 1(17). С. 26 – 31.
- 9. Takens F. On the numerical determination of the dimenthion of an attractor // Dynamical systems and bifurcations / ed. by B. L. J. Braaksma, H. W. Broer, F. Takens. Heidelberg, 1985. P. 99-106.

- 10. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica9D. 1983. P. 189–208.
- 11. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // Dynamical Systems and Turbulence / ed. by D. A. Rang, L. S. Young. Berlin, 1981. P. 366–381.
- 12. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
- 13. Пат. 2688340 Российская Федерация. Способ вибродиагностирования газотурбинного двигателя / Тяпкин С. А. Заявл. 30.09.15; опубл. 21.05.19, Бюл. № 15.
  - 14. Кузнецов С. П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001. 295 с.
- 15. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2011. 164 с.
- 16. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: ЗАО «Университетская книга», 2005. 848 с.
- 17. Ахметханов Р. С., Никифоров А. Н. Применение вейвлет-анализа для исследования нестационарных процессов роторных систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. № 2. С. 52–61.
- 18. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Коптев Д. С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики и прогностики состояния авиационного комплекса «человек машина» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 46–57.
- 19. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Стратегия разработки систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т.17, № 2. С. 65–70.
- 20. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Этапы разработки систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. С. 208–215.

#### References

- 1. Gordin M. V., Palkin V. A. Kontseptsii aviatsionnykh dvigatelei dlya perspek-tivnykh passazhirskikh samoletov [Aircraft engine concepts for prospective passenger aircraft]. *TsIAM, Aviatsionnye dvigateli* = *TsIAM, Aircraft engines*, 2019, no. 3 (4), pp. 7–16. (In Russ.)
- 2. VVS Kitaya i drugikh stran [The Chinese Air Force and other countries]. (In Russ.) Available at: https://ru.wikipedia.org. (accessed 04.03.2020)
- 3. Programmnoe obespechenie «SKAT», AO NPP «Topaz» [Software "SKAT", JSC NPP "Topaz"]. (In Russ.) Available at: https://topazlab.ru/products/ckat-system/. (accessed 03.04.2020)

- 4. Bortovye raspredelennye sistemy sbora i obrabotki informatsii pri letnykh ispytaniyakh. NPP «Mera» [On-board distributed systems for collecting and processing information during flight tests. NPP "Mera"]. (In Russ.) Available at: http://www.nppmera.ru/. (accessed 03.03.2020)
- 5. Biblioteki identifikatsionnykh algoritmov tsifrovoi obrabotki signalov [Libraries of identification algorithms for digital signal processing]. (In Russ.) Available at: www.labview.ru/labview/algorithm/. (accessed 12.03.2020)
- 6. Pribor dlya kontrolya zagryazneniya rabochikh zhidkostei gidrosistem icountLCM20 [Instrument for monitoring the contamination of hydraulic fluids icountLCM20]. (In Russ.) Available at: https://parker-store.by/files/blocks/07. (accessed 04.03.2020)
- 7. Ushakov A. P. [Application of laser vibration diagnostics in the process of bench tests of units of aircraft]. Problemy ekspluatatsii i sovershen-stvovaniya transportnykh system. Mezhvuz. temat. sb. nauch. tr. [Problems of operation and improvement of transport systems. Mezhvuz. topics Sat scientific works]. St. Petersburg, 2009, vol. 11, pp. 5–11. (In Russ.)
- 8. Akhmetkhanov R. S. Primenenie teorii fraktalov i veivlet-analiza dlya vyyavleniya osobennostei vremennykh ryadov pri diagnostike sistem [Application of the theory of fractals and wavelet analysis to identify the features of time series in the diagnosis of systems]. Bulletin of scientific and technological development = Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya, 2009, no 1 (17), pp. 26–31. (In Russ.)
- 9. Takens F. On the numerical determination of the dimenthion of an attractor. Dynamical systems and bifurcations; ed. by B. L. J. Braaksma, H. W. Broer, F. Takens. Heidelberg, 1985, pp. 99–106.
- 10. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors. Physica9D, 1983, pp. 189–208.
- 11. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. Dynamical Systems and Turbulence; ed. by D. A. Rang, L. S. Young. Berlin, 1981, pp. 366–381.
- 12. Cronover R. M. Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh [Fractals and chaos in dynamical systems]. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 352 p. (In Russ.)
- 13. Tyapkin S. A. Sposob vibrodiagnostirovaniya gazoturbinnogo dvigatelya [The method of vibration diagnostics of a gas turbine engine]. Patent RF, no. 2688340, 2019. (In Russ.)
- 14. Kuznetsov S. P. Dinamicheskii khaos [Dynamic chaos]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 295 p. (In Russ.)
- 15. Chumak O. V. Entropii i fraktaly v analize dannykh [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2011. 164 p. (In Russ.)
- 16. Potapov A. A. Fraktaly v radiofizike i radiolokatsii. Topologiya vyborki [Fractals in radiophysics and radar. Topology of the sample]. Moscow, ZAO "Universitetskaya kniga", 2005. 848 p. (In Russ.)
- 17. Akhmetkhanov R. S., Nikiforov A. N. Primenenie veivlet-analiza dlya issledovaniya nestatsionarnykh protsessov rotornykh sistem [Application of wavelet analysis for the study of non-stationary processes of rotor systems]. Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = *Problems of mechanical engineering and automation*, 2005, no. 2, pp. 52 – 61. (In Russ.)

- 18. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Koptev D. S. Napravleniya i prakticheskie rezul'taty sozdaniya metodov i sredstv diagnostiki i prognostiki sostoyaniya aviatsionnogo kompleksa «chelovek mashina» [Directions and practical results of creating methods and diagnostic tools and prognostics of the state of the man-machine aviation complex]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 46 57. (In Russ.)
- 19. Koptev D. S., Mukhin I. E. Strategiya razrabotki sistem diagnostiki i prognostiki tekhnicheskogo sostoyaniya perspektivnykh letatel'nykh apparatov [Development Strategy for Diagnostic and Prediction Systems for the Technical Condition of Advanced Aircraft]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information Measuring and Control Systems*, 2019, vol. 17. no. 2. pp. 65 70. (In Russ.)
- 20. Koptev D. S., Mukhin I. E. [Stages of developing diagnostic and prognostic systems for the technical condition of promising aircraft]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii. Sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles based on materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2019, pp. 208 215. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the Authors

Тяпкин Сергей Александрович, инженер-конструктор, АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК»), г. Москва, Российская Федерация

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

Коптев Дмитрий Сергеевич, аспирант, преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация e-mail: d.s.koptev@mail.ru

**Sergey A. Tyapkin**, Design Engineer, United Engine Corporation, Moscow, Russian Federation

**Ivan E. Mukhin**, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

**Dmitry S. Koptev**, Post-Graduate Student, Lecturer at the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: d.s.koptev@mail.ru

### Оригинальная статья / Original article

УДК 629.7.08

## Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей

С. А. Тяпкин $^{1}$ , И. Е. Мухин $^{2}$ , Д. С. Коптев $^{2}$  ⊠

#### Резюме

Целью исследования является разработка метода совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей.

Методы. В статье рассмотрено применение фрактальных методов Херста и Бароу для оценки структуры вибросигнала. Особенностью данных методов является то, что в качестве информационного параметра используется показатель, характеризующий угол наклона соответствующей фрактальной функции к оси абсцисс и оценивающий степень модификации фрактальной размерности исследуемого процесса. Различные проявления свойств сигналов, описываемых понятиями формы и вариабельности, могут быть выражены количественно, в виде особых, идентификационных чисел. Подобный подход позволяет обнаружить ранее неизвестные закономерности, связывающие между собой различные формы сигналов.

Результаты. В статье определено, что суммарное применение показателя структуры вибросигнала и S-тестера для диагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф позволяет обнаружить дефект межроторного подшипника за 4 - 7 полётов до его разрушения с вероятностью 0,94. Получен важный отрицательный результат – данные показатели не определяют состояние второго опорного подшипника – межвалового. Для решения задачи диагностирования межвалового подшипника предлагается оснастить цифровой регулятор двигателя виброакустическим каналом измерения вибросигнала, который достаточно хорошо обнаруживает появление дефекта как межроторного, так и межвалового, но с меньшей вероятностью определяет момент отстранения двигателя от эксплуатации.

Заключение. В статье разработан новый метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей. С внедрением этого метода система диагностирования авиационных двигателей приобретает новое качество и позволит динамически управлять ресурсом изделия на основе достоверной информации об отсутствии или наличии дефекта МРП/МВП, оптимизировать процедуры его осмотра, технического обслуживания и ремонта по периодичности и объёму, снизить стоимость жизненного цикла изделия на этапе его эксплуатации.

© Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК») пр. Буденного, 16, г. Москва 121357, Российская Федерация

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; межроторный подшипник; межваловый подшипник; вибросигнал; фрактальные методы; идентификационные измерения.

**Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Тяпкин С. А., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 57–67.

Поступила в редакцию 31.03.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 25.05.2020

# Method of Joint Application of the Vibration Signal Structure Indicator and The Known Results of Identification Measurements in the Problems of Preventive Detection of Faults of Aircraft Engines

Sergey A. Tyapkin<sup>1</sup>, Ivan E. Mukhin<sup>2</sup>, Dmitry S. Koptev<sup>2</sup> ⊠

⊠ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

#### Abstract

The purpose of the research is to develop a method for the combined application of the vibration signal structure indicator and the known results of identification measurements in the problems of preventive detection of aircraft engine malfunctions.

**Methods.** The article discusses the use of the fractal methods of Hirst and Barow to assess the structure of a vibration signal. A feature of these methods is that an indicator characterizing the angle of inclination of the corresponding fractal function to the abscissa axis and assessing the degree of modification of the fractal dimension of the process under study is used as an information parameter. Various manifestations of the properties of signals described by the concepts of shape and variability can be expressed quantitatively, in the form of special identification numbers. This approach makes it possible to detect previously unknown patterns that connect various signal forms.

Results. It is determined in the article that the total application of the vibration signal structure indicator and the Stester for diagnosing engines of the AL-31F family makes it possible to detect a defect in the inter-rotor bearing in 4-7 flights before its destruction with a probability of 0.94. An important negative result was obtained - these indicators do not determine the state of the second support bearing - the shaft bearing. To solve the problem of diagnosing an inter-shaft bearing, it is proposed to equip a digital engine regulator with a vibroacoustic channel for measuring a vibration signal, which quite well detects the appearance of both an inter-shaft and inter-shaft defect, but worse determines the moment when the engine is removed from operation.

**Conclusion.** The article developed a new method of joint application of the vibration signal structure indicator and the known results of identification measurements in the problems of preventive detection of aircraft engine malfunctions. With the introduction of this method, the aircraft engine diagnostics system acquires a new quality and will allow dynamically managing the product resource based on reliable information about the absence or presence of

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> JSC «United Engine Corporation»

Budennogo pr. 16, Moscow 121357, Russian Federation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

a defect in the MCI / MVP, optimizing the procedures for its inspection, maintenance and repair in terms of frequency and volume, and reducing the cost of the product life cycle stage of its operation.

Keywords: aircraft engine; inter-rotor bearing; inter-shaft bearing; vibration signal; fractal methods; identification measurements.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Tyapkin S. A., Mukhin I. E., Koptev D. S. Method of Joint Application of the Vibration Signal Structure Indicator and The Known Results of Identification Measurements in the Problems of Preventive Detection of Faults of Aircraft Engines. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika, Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University, Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020; 10(2): 57-67. (In Russ.)

Received 31.03.2020

Accepted 27.04.2020

Published 25.05.2020

#### Введение

Развитием теории диагностики и прогностики технического состояния авиационных двигателей может служить синергетический эффект совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений (ИИ) в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей. Основная идея подобных измерений состоит в том, что различные проявления свойств сигналов, описываемых понятиями формы и вариабельности, могут быть выражены количественно, в виде особых идентификационных чисел, что позволяет обнаружить неизвестные закономерности, ранее связывающие между собой различные формы сигналов.

Целью статьи является разработка метода совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов ИИ в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей.

Поскольку в основу диагностики и прогностики технического состояния авиационных двигателей заложен принцип обработки одномерной величины (вибросигнала), рассмотрим более подробно известные методы фрактальной геометрии, основанные на обработке одномерной физической величины, которые в дальнейшем могут быть применены для достижения поставленной цели.

С возникновения в 1975 г. фрактальной геометрии, связанной с именем Б. Мандельброта [1], стало возможным описание, упорядочивание и представление сложных сигналов фрактальными моделями в достаточно простом и наглядном виде. Фрактальный подход в последнее время всё больше применяется для решения задач идентификации процессов и объектов, отличающихся наличием компонент хаотического, детерминированного и периодического характера.

Например, к настоящему времени разработано большое количество методов анализа элетроэнцефалографических (ЭЭГ) данных, однако, практически все они имеют в своей основе спектральный анализ. Применение фрактальных параметров позволяет пойти значительно дальше: фиксировать и описывать изменения в работе головного мозга с учетом сильной индивидуальной вариабельности сигнала ЭЭГ [2].

## Материалы и методы

Рассмотрим два метода фрактальной геометрии, основанных на обработке одномерной физической величины.

**Метод Хёрста**. Пусть имеется ряд наблюдений  $\{x_1, x_2, :, x_n\}$  некоторой величины X, причем N – объем выборки,  $X_{cp}$  – среднее арифметическое ряда наблюдений

$$X_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i .$$

Примем за S среднеквадратическое отклонение ряда (СКО):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - X_{cp})^2} .$$
 (1)

Обозначим:

R — размах накопленного отклонения как разность между максимальным и минимальным накопленным отклонением  $Z_u$ :

$$R = \max_{1 \le u \le N} \left\{ Z_u \right\} - \min_{1 \le u \le N} \left\{ Z_u \right\}; \quad (2)$$

W — средняя дисперсия приращений как функция задержки  $\Delta N$ :

$$W(\Delta N) = \frac{1}{N - \Delta N} \sum_{i=1}^{N - \Delta N} (x_{i + \Delta N} - x_i)^2 . \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) вычислим параметр Херста R/S – отношение размаха накопленного отклонения R к СКО ряда S – при разных объемах выборки N. Зависимость R/S = f(N) описывается теоретической моделью, введенной Мандельбротом, для обобщенного броуновского движения [3]:

$$R/S = (AN)^H, (4)$$

где A — некоторая постоянная для конкретного процесса;  $0 \le H \le 1$  — показатель Херста, являющийся искомым параметром, характеризующим фрактальную размерность процесса.

Так как нужный нам параметр H является показателем степени, то для его нахождения представим зависимость (7) в логарифмическом масштабе:

$$\log(R/S) = H \log A + H \log N =$$

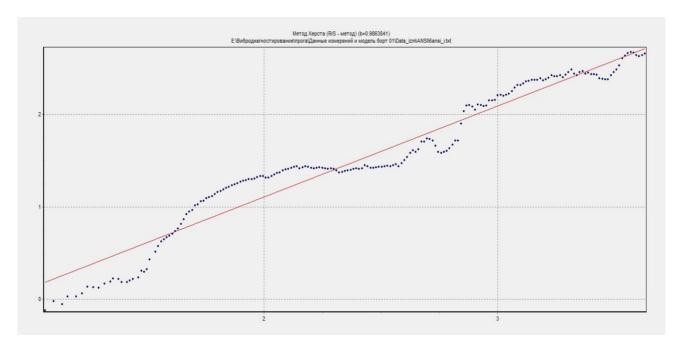
$$= const + H \log N.$$
(5)

Откуда

$$H \Rightarrow \frac{\log(R/S)}{\log N}.$$
 (6)

Фрактальная функция в двойных логарифмических координатах представлена на рисунке 1, где угол наклона аппроксимирующей прямой линии будет являться коэффициентом Херста.

Теоретически доказано [4], что для случайного процесса (броуновского движения) H=0,5. Для сигналов, имеющих трендовую составляющую, показатель H стремится к единице.



**Рис. 1**. Фрактальная функция и её линейная аппроксимация, построенные методом Херста (H=0.98)

Fig. 1. Fractal function and its linear approximation, constructed by the Hurst method (H=0.98)

Кроме того, показатель H для двумерных физических систем связан с размерностью D соотношением [5; 6]:

$$D = 2 - H$$
,

и по этой причине размерность динамических систем можно также исследовать с помощью коэффициента Херста Н.

Метод Барроу. С помощью формулы (3) становится возможным определить среднюю дисперсию приращений функцию от задержки сигнала  $W=f(\Delta N)$ , которая описывается теоретической моделью:

$$W = (A\Delta N)^B$$
,

где A — некоторая постоянная;  $0 \le B \le 1$  показатель Барроу, нахождение которого подобно нахождению показателя Херста Н. По аналогии с формулой (6) имеем

$$B \Rightarrow \frac{\log W}{\log \Delta N}.$$

Соответствующая фрактальная функция и ее линейная аппроксимация представлены ниже (рис. 2).

Таким образом, общей особенностью всех рассмотренных фрактальных методов является то, что в качестве информационного параметра используется характеризующий показатель, угол наклона соответствующей фрактальной функции к оси абсцисс. Этот показатель с физической точки зрения оценивает ту или иную модификацию фрактальной размерности исследуемого процесca.

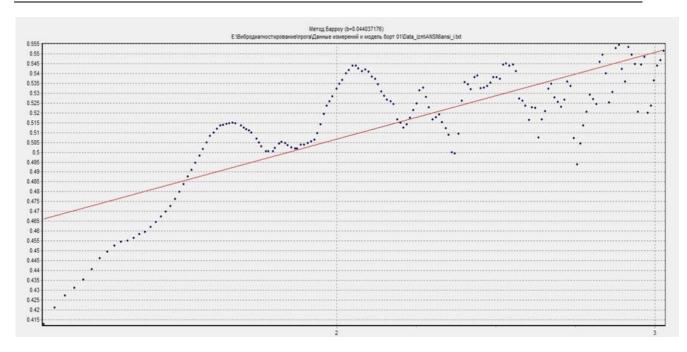


Рис. 2. Фрактальная функция и ее линейная аппроксимация, построенные методом Барроу (В=0,04)

Fig. 2. Fractal function and its linear approximation, constructed by the Barrow method (B = 0,04)

В 2000-х годах в Омском государственном техническом университете под руководством доктора технических наук, профессора Ю. Н. Кликушина было развито новое научное направление в теории и технике измерений идентификационные измерения (ИИ) сигналов [7; 8; 9; 10; 11]. ИИ объединяют средства, методы и технологии решения задач автоматического распознавания, классификации и идентификации сигналов. Областью приложения ИИ являются медицинская и техническая диагностика, интеллектуальное приборостроение, а также те направления, в которых требуется количественно оценить качественное состояние сложных объектов или процессов.

Содержанием ИИ является измерение формы и вариабельности сигналов. Под понятием «форма» понимается вид

закона распределения мгновенных значений (РМЗ) выборочной реализации сигнала. Понятие вариабельности учитывает характер распределения значений временных интервалов (РВИ) сигнала, формируемых при пересечении сигналом некоторого, например нулевого, уровня.

Основными элементами СИИ с точки зрения задачи диагностирования являются тестеры идентификационных параметров, в которых осуществляется преобразование массива чисел в одно идентификационное число. К РМЗ-тестерам относятся Р-, NF-, S- и А-тестеры, а к РВИ-тестерам – K- и G-тестеры [12; 13].

Количественные соотношения между распределениями мгновенных значений сигналов разной формы получили название идентификационных

шкал (ИШ). Примером ИШ может служить таблица, в которой имена законов распределений случайных сигналов оцифрованы с помощью так называемого, S-тестера [7; 8]. При этом для обозначения случайных сигналов были использованы сокращения, принадлежа-

щие словарю имен симметричных распределений: двумодального (2mod)арксинусного (asin), равномерного (even), треугольного (simp), нормального (gaus), двустороннего экспоненциального (lapl) и Коши (kosh).

Таблица 1. Идентификационные шкалы **Table 1**. Identification scales

Шкала	Вид распределения случайного сигнала						
S-тестера	2mod	asin	even	simp	gaus	lapl	kosh
S, % (N=10000)	100	92,3	75	51	31,7	15,3	0,06
Δε, % при p=0,95	0	0,56	1,07	2,08	9,5	18,3	167

Для проверки работоспособности предлагаемых методов вибродиагностирования проведены натурные испытания. В качестве датчиков использовалатчики вибрации, описан-ЛИ ные в [4]. Исходные данные в виде файлов полётов, в некоторых из которых произошло выключение двигателя, готовило АО «НПП Топаз» - поставщик программы «СКАТ» для анализа полётной информации большинства летательных аппаратов государственной авиации. Данные готовились следующим образом:

- предварительная информация об исправности/неисправности двигателей отсутствует;
- даты полётов, номера бортов и (использование двигателей удалены сторонних данных невозможно);

- файл полёта содержит только уровни вибрации со штатного датчика левого и правого двигателей (все другие данные - обороты роторов, температура, давление, высота, скорость, перегрузки и т. п. – удалены) [14; 15];
- файлы крайних полётов, в которых по данным программы «СКАТ» выявлен рост амплитуды вибросигнала от эталонного значения перед аварийной остановкой двигателя, удалены (для выяснения зависимости результатов от амплитуды вибросигнала) [16].

#### Результаты и их обсуждение

Как показали натурные испытания, совместное применение двух показателей вибросигнала (Pstr и S-тестера) позволяет обнаружить дефект МРП за 4-7 полётов до его разрушения с достоверностью 0,94 и вероятностью ложного дефекта приблизительно равной нулю. Время обработки данных на персональном компьютере – 2 мин/полёт.

Получен также важный отрицательный результат - данные показатели не определяют состояние второго опорного подшипника – межвалового. Поэтому для решения задачи диагностирования межвалового подшипника предлагается цифровой регулятор двигателя оснастить виброакустическим каналом измерения вибросигнала. Выяснилось, что данный канал достаточно хорошо обнаруживает появление дефекта как МРП, так и МВП, но хуже определяет момент отстранения двигателя от эксплуатации. Именно эту роль следует возложить на Pstr+S-тестер в отношении МРП и разработать специальный программный модуль для МВП [17; 18].

Показатель структуры вибросигнала Pstr и S-тестер обладают рядом уникальных особенностей:

1) они зависят не от амплитуды вибросигнала, а от его внутренней структуры, под которой понимается число степеней свободы динамической системы, в которой вибросигнал является единственной наблюдаемой координатой и которая при развитии дефек-

- та начинает изменяться существенно раньше роста его амплитуды;
- 2) для вычисления показателей достаточен сигнал, поступающий со штатного датчика вибрации ГТД, никаких других данных не требуется, какоелибо моделирование вибросостояния двигателя не производится;
- 3) для внедрения этих методов дополнительных затрат делать нет необходимости. Вся инфраструктура в виде ПК или ноутбука и специалистов имеется.

#### Выводы

Таким образом, разработан новый метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей. С внедрением этого метода система диагностирования авиационных двигателей приобретает новое качество и позволит:

- 1. Динамически управлять ресурсом изделия на основе достоверной информации об отсутствии или наличии дефекта МРП/МВП.
- 2. Оптимизировать процедуры его осмотра, технического обслуживания и ремонта по периодичности и объёму.
- 3. Снизить стоимость жизненного цикла изделия на этапе его эксплуатации.

#### Список литературы

- 1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- 2. Нелинейно-динамический анализ ЭЭГ человека. URL: www.chat.ru/papers/paper1/paper.htm (дата обращения: 02.02.2020).

- 3. Федер Е. Фракталы / под ред. Ю. А. Данилова, А. Шукурова. М.: Мир, 1991. 261 c.
- 4. Библиотеки идентификационных алгоритмов цифровой обработки сигналов. URL: www.labview.ru/labview/algorithm/ (дата обращения: 12.02.2020).
- 5. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 352 c.
- 6. Терехов С. В. Фракталы и физика подобия. Донецк: Цифровая типография, 2011. 255 c.
- 7. Кликушкин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Идентификационный способ измерения параметров сигналов // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 229–235.
- 8. Кликушкин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Идентификационный способ классификации сигналов // Омский научный вестник. 2013. № 2 (121). С. 267–272.
- 9. Klikushin Y. N., Kobenko V. Y., Stepanov P. P. Basics of identification measurement technology // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 94. P. 012050. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012050.
- 10. Кобенко В. Ю. Методы идентификации процессов на фрактальных шкалах: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2000. 153 с.
- 11. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Коптев Д. С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики и прогностики состояния авиационного комплекса «человек – машина» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 46 – 57.
- 12. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов, Д. С. Коптев; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. 212 с.
- 13. Пат. 2688340 Российская Федерация. Способ вибродиагностирования газотурбинного двигателя / Тяпкин С. А. Заявл. 30.09.15, опубл. 21.05.19, Бюл. № 15.
- 14. Pappu R. P. Acoustic emission detection using optical fibre sensors for the aerospace applications. Birmingham: Aston Univ., 2011. P. 189–213.
- 15. Staszewski W., Boller C., Tominson G. R. Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York: Sohn Wiley & Sons, 2004. 288 p.
- обеспечение AO 16. Программное «CKAT», НПП «Топаз». URL: https://topazlab.ru/products/ckat-system/ (дата обращения: 03.04.2020).
- 17. Guo H., Xiao G, Mrad N. Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft platforms. Sensors, 2011. P. 47 – 53.
- 18. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Стратегия разработки систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 2. С. 65–70.

#### References

- 1. Mandelbrot B. Fraktal'naya geometriya prirody [Fractal geometry of nature]. Moscow, Institute for Computer Research Publ., 2002. 656 p. (In Russ.)
- 2. Nelineino-dinamicheskii analiz EEG cheloveka [Nonlinear dynamic analysis of human EEG]. (In Russ.) Available at: www.chat.ru/papers/paper1/paper.htm. (accessed 02.06.2020)
- 3. Feder E. Fraktaly [Fractals]; ed. by Yu. A. Danilova, A. Shukurova. Moscow, Mir Publ., 1991. 261 p. (In Russ.)
- 4. Biblioteki identifikatsionnykh algoritmov tsifrovoi obrabotki signalov [Libraries of identification algorithms for digital signal processing]. (In Russ.) Available at: www.labview.ru/labview/algorithm/. (accessed 12.02.2020)
- 5. Kronover R. M. Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh [Fractals and chaos in dynamical systems]. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 352 p. (In Russ.)
- 6. Terekhov S. V. Fraktaly i fizika podobiya [Fractals and Physics of Similarity]. Donetsk, Digital Printing House, 2011. 255 p. (In Russ.)
- 7. Klikushkin Yu. N., Kobenko V. Yu. Identifikatsionnyi sposob izmereniya parametrov signalov [An identification method for measuring signal parameters]. *Omskii nauchnyi vestnik* = *Omsk Scientific Bulletin*, 2014, no. 3 (133), pp. 229–235. (In Russ.)
- 8. Klikushkin Yu. N., Kobenko V. Yu. Identifikatsionnyi sposob klassifikatsii signalov [An identification method for classifying signals]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (121), pp. 267 272. (In Russ.)
- 9. Klikushin Y. N., Kobenko V. Y., Stepanov P. P. Basics of identification measurement technology. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944: AMSD, p. 012050. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 944/1/012050
- 10. Kobenko V. Yu. Metody identifikatsii protsessov na fraktal'nykh shkalakh. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods of identification of processes on fractal scales. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2000. 153 p. (In Russ.)
- 11. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Koptev D. S. Napravleniya i prakticheskie rezul'taty sozdaniya metodov i sredstv diagnostiki i prognostiki sostoyaniya aviatsionnogo kompleksa «chelovek mashina» [Directions and practical results of creating methods and tools for diagnostics and prognostics of the state of the aviation complex "man-machine"]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 46–57. (In Russ.)
- 12. Mukhin I. E., Mukhin A. I., Mikhailov S. N., Koptev D. S. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh i letatel'nykh appa-

ratov [Methodological bases of synthesis of systems for diagnostics of technical condition of space and aircraft]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018. 212 p. (In Russ.)

- 13. Tyapkin S. A. Sposob vibrodiagnostirovaniya gazoturbinnogo dvigatelya [Method for vibration diagnostics of a gas turbine engine]. Patent RF, no. 2688340, 2019. (In Russ.)
- 14. Pappu R. P. Acoustic emission detection using optical fiber sensors for the aerospace applications. Birmingham, Aston Univ., 2011, pp. 189-213.
- 15. Staszewski W., Boller C., Tominson G. R. Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York, Sohn Wiley & Song, 2004. 288 p.
- 16. Software "SKAT", JSC NPP "Topaz". (In Russ.) Available at: https://topazlab.ru/ products/ckat-system/. (accessed 03.04.2020)
- 17. Guo H., Xiao G., Mrad N. Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft platforms. Sensors, 2011, pp. 47-53.
- 18. Koptev D. S., Mukhin I. E. Strategiya razrabotki sistem diagnostiki i prognostiki tekhnicheskogo sostoyaniya perspektivnykh letatel'nykh apparatov [Strategy for the development of systems for diagnostics and prognostics of the technical state of promising aircraft]. Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 65–70. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the Authors

Тяпкин Сергей Александрович, инженер- Sergey A. Tyapkin, Design Engineer, конструктор, AO «Объединённая двигате- United Engine Corporation, Moscow, Rusлестроительная корпорация» (АО «ОДК»), г. Москва, Российская Федерация

sian Federation

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

Ivan E. Mukhin, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

Коптев Дмитрий Сергеевич, аспирант, преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Post-Graduate Student, Lecturer at the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: d.s.koptev@mail.ru

## РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

## IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

## Разработка инструмента для анализа речи пациента при болезни Паркинсона

Окороджи Дюк Филип Чике<sup>1</sup>, Ю. А. Орлова<sup>1</sup> ⊠, В. Л. Розалиев<sup>1</sup>, А. С. Кузнецова<sup>1</sup>, В. В. Гилка<sup>1</sup>

 $\bowtie$  e-mail: yulia.orlova@gmail.com

#### Резюме

**Цель исследования** представляет собой разработку концепции инструмента для моделирования патологических речевых сигналов. Это исследование предназначено для анализа патологических речевых сигналов с учетом различных речевых измерений: фонообразования, артикуляции, просодии и разборчивости.

**Методы.** В статье предлагается методика выявления признаков болезни Паркинсона (БП) через свободную речь в неконтролируемой фоновой среде. Механизм обнаружения включает методы обработки сигналов и речи. Этот инструмент был разработан для моделирования речевых сигналов дизартрии людей с болезнью Паркинсона.

Использование этого инструмента позволяет реализовать выполнение задач:

- моделирование записи голоса с учетом вышеупомянутых параметров речи;
- автоматическое распознавание речевых сигналов Паркинсона.

Набор данных записей от пациентов с болезнью Паркинсона был собран из сайта (UCI Machine Learning Repository).

Данные обучения относятся к 20 пациентам с болезнью Паркинсона (БП) и 20 здоровым субъектам. Из всей выборки полученных записей голоса были отобраны 26 типов звукозаписей.

**Результаты** этой работы представляют собой первый шаг к разработке автоматизированного инструмента для крупномасштабной оценки продромального нарушения голоса во время нейродегенерации при болезни Паркинсона. С помощью полученых результатов представляется возможным проведение фундамантального исследования с использованием автоматического количественного голосового анализа естественной речи. Недавно разработанные методы (нейромеханики речевой артикуляции, Viterbi) оказались недостаточно прозрачными, чтобы дать представление о типичных паттернах продромального голосового дефицита с паркинсонизмом.

© Окороджи Дюк Филип Чике, Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., Кузнецова А. С., Гилка В. В., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) пр. им. В. И. Ленина 28, Волгоград 400006, Российская Федерация

Заключение. В этом исследовании рассмотрены способы анализа речевых сигналов у пациентов с болезнью Паркинсона и разработка автоматизированного инструмента для широкомасштабной оценки нарушений во время нейродегенерации при болезнях Паркинсона. Произвели сбор 26 образцов голоса и различных типов звука, включая устойчивые гласные, слова и предложения, составленные из набора речевых упражнений. В результате анализа набора данных, параллельно с результатами, представленными в литературе, было обнаружено, что устойчивые гласные несут больше информации, различающей БП, чем отдельные слова и короткие предложения.

Ключевые слова: болезнь Паркинсона; фонология; артикуляция; автоматическое распознавание речи.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области (гранты 18-07-00220, 19-07-00020, 19-47-343001, 19-47-340003, 19-47-340009, 19-47-340013, 19-47-343002, 19-37-90060, 20-07-00502).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Разработка инструмента для анализа речи пациента при болезни Паркинсона / Окороджи Дюк Филип Чике, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. С. Кузнецова, В. В. Гилка // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 68-83.

Поступила в редакцию 25.03.2020

Подписана в печать 30.04.2020

Опубликована 25.05.2020

## Development of a Tool for Analyzing the Speech of a Patient with Parkinson's Disease

Okoroji Duke Philip Chike<sup>1</sup>, Yulia A. Orlova<sup>1</sup> \(\subseteq\), Vladimir L. Rozaliev<sup>1</sup>, Agnessa S. Kuznetsova<sup>1</sup>, Vadim V. Gilka<sup>1</sup>

#### Abstract

The purpose of the research is a conceptual tool for modeling pathological speech signals which can be used for the analysis of speech signal of patients with Parkinson's disease. This study helps in the analysis of pathological speech signals, taking into account various speech measurements: phonation, articulation and intelligibility.

Methods. This article proposes a technique for identifying signs of Parkinson's disease (PD) through free speech in an uncontrolled background environment. The detection mechanism uses signal and speech processing techniques. This tool was designed to model speech signals.

Using this tool, we analyzed the implementation of two different tasks:

- modeling of voice recording taking into account the above-mentioned speech parameters;
- automatic recognition of speech signals of Parkinson.

Compilation of data was compiled from. The data refers to 20 patients with Parkinson's disease (PD) and 20 healthy subjects. Several types of sound recordings were taken from all subjects (26).

Results. The results of this work represent the first step towards the development of a fully automated tool for largescale assessment of disorders during neurodegeneration in Parkinson's diseases. Our results show that it is time for basic research using automatic quantitative analysis of natural speech. Recently developed methods have proved transparent enough to give an idea of the typical patterns of prodromal voice deficiency with Parkinson's.

Volgograd State Technical University (VSTU) avenue V. I. Lenina 28, Volgograd 400006, Russian Federation

**Conclusion.** In this study, ways of analyzing speech signals in patients with Parkinson's disease and development of a fully automated tool for large-scale assessment of disorders during neurodegeneration in Parkinson's diseases. Due to the recent interest in speech pattern analysis applications of PD for building predictive tele diagnosis and tele monitoring models, we have collected a wide variety of voice samples and various sound types, including sustained vowels, words, and sentences compiled from a set of speaking exercises. As a result of the analysis of our dataset, in parallel to the results reported in the literature, sustained vowels have been found to carry more PD-discriminative information than the isolated words and short sentences do.

Keywords: Parkinson's disease; Phonology; Articulation; Clarity; automatic speech recognition.

**Funding**: The work was partially supported by the RFBR and the administration of the Volgograd region (grants 18-07-00220, 19-07-0020, 19-47-343001, 19-47-340003, 19-47-340009, 19-47-340013, 19-47-343002, 19-37-90060, 20-07-00502).

**Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Okoroji Duke Philip Chike, Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Kuznetsova A. S., Gilka V. V. Development of a Tool for Analyzing the Speech of a Patient with Parkinson's Disease. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(2): 68–83. (In Russ.)

Received 25.03.2020 Accepted 30.04.2020 Published 25.05.2020

Введение

Болезнь Паркинсона (БП) – это нейродегенеративное расстройство центральной нервной системы, которое вызывает частичные или полные потери двигательных функций, речи, поведения, умственной деятельности и других жизненно важных функций. Впервые доктор Дж. Паркинсон описал как «шокирующий паралич», наблюдаемый у пожилых людей и вызывающий нарушения речи и двигательных способностей (письмо, баланс и т. д.), у 90% пациентов. По оценкам, у 70-90% пациентов с БП также развиваются нарушения речи или голоса [1], в частности гипокинетическая дизартрия. До 90% пациентов с БП развивают характерные для восприятия речевые и голосовые аномалии, совокупно называемые гипокинетической дизартрией, характеризую-

щиеся снижением качества голоса, гипокинетической артикуляцией, гипофонией, монозвучием, монотонностью и дефицитом времени [2]. Однако предыдущие исследования в основном были сосредоточены на более поздних стадиях БП [2], в то время как идентификация различных паттернов голосовых нарушений в доклиническом течении нейродегенерации БП была строго ограниченна [3]. Выявленные им эффекты в речи и фонации, собранные под общим термином «гипокинетическая дизартрия», весьма актуальны и печально известны, поскольку являются субъективными клиническими показателями дегенерации нейромотора, в том смысле, что существуют «убедительные доказательства того, что речь может помочь количественно оценить не только моторные симптомы, но и обобщенные разнообразные симптомы при БП» [4].

Последние достижения в области вычислительной техники и электроники позволили исследователям изучить амбициозные концепции, такие как умные дома или персонализированная медицина, и приблизить нас к реализации окружающего интеллекта в нашей повседневной среде [5; 6]. Окружающий интеллект может обеспечить недорогой мониторинг здравоохранения ненавязчивым образом и значительно расширить область здравоохранения. Исследователи уделяют все больше внимания использованию портативных устройств, таких как смартфон, для неинвазивных измерений. Яркими примерами этого направления в отношении PD являются исследования Джона Хопкинса [7] и mPower [8]. В этих исследованиях эффективность обнаружения частичных разрядов с помощью внутреннего микрофона смартфона не сравнивается с обнаружением с помощью профессионального микрофона. Поэтому остается неясным, насколько качество канала записи влияет на производительность. Запись голосового сигнала самый ранний, простой и неинвазивный метод диагностики БП [9].

Сфера информации и технологий может оказать серьезную поддержку в изучении болезней с помощью анализа биомедицинских сигналов [10; 11].

В [12] авторы анализируют артикуляцию гласных у пациентов с БП, сравнивая их со здоровыми людьми с поалгоритмов. мощью математических

Также был предложен голосовой анализ и разработаны различные алгоритмы для предотвращения и обнаружения частичных разрядов [13; 14; 15].

В [16] авторы оценивают голоса пациентов с БП, чтобы найти связь с нарушением подвижности. Другие работы сосредоточены на обнаружении голосовых нарушений у пациентов с болезнью Паркинсона, анализируя артикуляцию гласных с помощью бесплатного программного обеспечения или предлагая новые инструменты [17].

Гипокинетическая фонация характеризуется блокировкой голоса, изменениями в энергии и основной частоте специфической низкой частоты (тремор или патологическое колебания), гипотонической (астенической) фонацией и т. д. Гипокинетическая дизартрия может проявляться как уменьшение величины и скорости артикуляции, движепомимо показа межсуставных нарушений синхронизации. Эти проявления, по-видимому, являются результатом нейромоторных нарушений, влияющих на «индивидуальные или коллективные движения артикуляторов, таких как челюсть, язык и губы. Нарушения голоса, артикуляции и подвижности могут присутствовать на ранних стадиях БП, даже если нарушения голоса возникают чаще, чем нарушения артикуляции, и возникают раньше у пациентов с БП с последующими нарушениями артикуляции и флуктуации.

В статье авторы представили систематический обзор литературы о компьютерных системах, разработанных для поддержки речевой и языковой терапии, в основном посвященных артикуляции и фонологическим нарушениям. «Все исследования представили свои собственные разработанные инструменты и использовали их для вмешательства, кроме одного исследования, в котором применялось ранее разработанное программное обеспечение» [18].

Фактические данные свидетельствуют о том, что исследовательскому сообществу, пациентам, врачам и терапевтам не хватает вычислительных инструментов, включая удобный пользователя интерфейс, способный выполнять несколько анализов, с возможностью персонализации или адаптирования, в соответствии с потребностями пользователей. В этой статье представлен инструмент для полуавтоматического анализа речевых сигналов. Он включает измерения, необходимые для моделирования четырех речевых измерений: фонация, артикуляция, просодия и разборчивость. Этот инструмент был разработан и испытан на речевых сигналах Паркинсона. Инструмент предназначен для раздельного анализа фонации, артикуляции, просодии и разборчивости, поэтому его результаты могут интерпретироваться медицинским экспертом отдельно [19].

Этот инструмент использует 3 различных вида анализа: фонологический анализ, анализ артикуляции, анализ разборчивости. Эти анализы показаны отдельно, поэтому медицинские эксперты могут лучше их интерпретировать.

#### Материалы и методы

## Фонологический анализ. Фонаторная способность

Динамика была проанализирована, как правило, с точки зрения характеристик, связанных с мерами нарушения, такими как дрожание (временное нарушение основной частоты), мерцание (временное нарушение амплитуды сигнала), коэффициент нарушения амплитуды (КНА) и коэффициент нарушения основного тона (КНО). КНА и КНО — это долгосрочные показатели нарушения амплитуды и высоты тона сигнала, соответственно. В дополнение к мерам нарушения степень невокализованного также включена.

Джиттер и шиммер характеризуют временные нарушения частоты и амплитуды речи, соответственно. Джиттер (%) вычисляется в соответствии с формулой (1):

Джиттер = 
$$\frac{100}{N.M_f} \sum_{k=1}^{N} |vf_0(k) - M_f|, (1)$$

где N — число кадров речевого высказывания;  $M_{\rm f}$  — максимум основной частоты, а  $vf_0(k)$  соответствует основной частоте, вычисленной в k-м кадре.

Шиммер (%) вычисляется с использованием формулы (2):

Шиммер = 
$$\frac{100}{N.M_a} \sum_{k=1}^{N} |A(k) - M_a|, (2)$$

где  $M_a$  — максимальная амплитуда сигнала, а A(k) соответствует амплитуде в k-м кадре.

Коэффициенты нарушения амплитуды (КНА) характеризует долговре-

менную изменчивость амплитуды от пика к пику в речевом сигнале. Коэффициент вычислялся при сглаживании одиннадцати голосовых периодов, и он рассчитывался как абсолютная средняя разница между амплитудой кадра и амплитудами, усредненными по его соседям, деленная на среднюю амплитуду. Аналогично, коэффициент основного тона (КНО) характеризует долговременную изменчивость основной частоты с коэффициентом сглаживания пяти периодов. Он рассчитывается как абсолютная средняя разница между частотой каждого кадра и средним значением его соседей, деленная на среднюю частоту. Оба коэффициента нарушения вычисляются с использованием формулы (3):

$$KB = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \frac{\left| \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} D(i+j-1) - D(i+m) \right|}{\left| \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M} M \cdot D(i) \right|}, (3)$$

где L = M - (k - 1), D (i) - последовапериода основного тельность (ППО) при вычислении КНО или последовательность амплитуд основного

тона (ПАО) при вычислении КНА; М длина ППО или ПАО; k – длина скользящей средней.

Степень невокализации рассчитывается как отношение между длительностью невокализованных кадров и общей продолжительностью высказывания. Степень рассчитывается на основе устойчивых фонаций, таким образом, она дает информацию о величине периодичности фонообразования.

Инструмент позволяет построить график с контуром основной частоты и изображением типа радара. Все сравнения выполняются в отношении соответствующей здоровой группы и полом говорящего. Такая фигура дает возможность визуально производить сравнения полученных результатов.

На рисунке 1 показана фигура радарного типа с мерами возмущения, извлеченными из гласного, произнесенного здоровым оратором (слева) и пациентом с БП (справа).

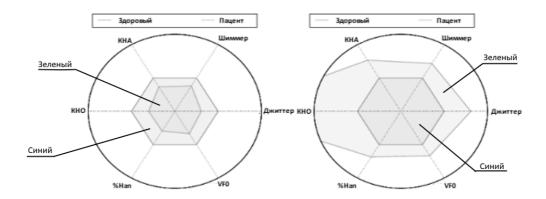


Рис. 1. Рисунки радарного типа для здорового говорящего (слева) и для пациента с БП (справа)

Fig. 1. Radar figure for a healthy speaker (left) and for a patient with Parkinson's disease (right)

Зеленый многоугольник соответствует значениям признаков, полученных от пациента, а синий многоугольник соответствует средним значениям признаков, извлеченных из здоровых ораторов.

Когда зеленый пятиугольник совпадает или находится внутри синего, это означает, что оба эти цвета находятся в том же диапазоне эталона.

#### Анализ артикуляции

Артикуляция связана с изменением положения, напряжения и формы нескольких конечностей и мышц, участвующих в процессе производства речи. Этот вид анализа может быть выполнен с постоянными гласными или с непрерывными речевыми сигналами. Когда рассматриваются устойчивые высказывания, используется несколько мер для оценки положения языка. Для случая непрерывных речевых сигналов в [19] был предложен новый подход для оценки способности пациентов с БП начинать и останавливать движение голосовой складки, основанный на результатах, полученных в [20]. В этом инструменте были реализовали оба подхода, используя устойчивые гласные и непрерывные речевые сигналы [21].

# **Артикуляция** в устойчивых гласных

Этот анализ, основанный на вычислении первых двух вокальных формант  $vf_1u \ vf_2$ . Такие показатели, как площадь гласного пространства, площадь голосового пятиугольника и коэффициент централизации формант (КЦФ), рассчи-

тываются для оценки артикуляционных возможностей динамиков. Площадь гласного пространства рассчитывается для количественной оценки возможных сокращений артикуляционных возможностей динамика. Такое уменьшение наблюдается как сжатие области вокального треугольника, которое найдено путем извлечения первых двух вокальных формант из английских гласных / а /, / і / и / и /. Затем площадь гласного пространства (ПГП) оценивается с помощью формулы (4):

$$\Pi\Pi = \frac{|F_{li}(F_{2a} - F_{2u}) + F_{la}(F_{2u} - F_{2i}) + F_{lu}(F_{2i} - F_{2a})|}{2}, (4)$$

где  $F_{1i}$  – вокальный формант  $vf_1u \ vf_2$  в соотношении с английскими гласными.

Когда первые два форманта из пяти английских гласных считаются вершинами многоугольника, вокальный пятиугольник формируется, и его область называется площадью голосового пятиугольника (ППГ). Эта мера позволяет производить количественную оценку и определяет артикуляционные способности говорящих, когда они произносят пять английских гласных. Площадь голосового пятиугольника (ППГ) была введен для оценки дефицита артикуляции у пациентов с БП.

Эта мера рассчитывается с использованием выражения

$$\Pi\Pi\Pi\Gamma = \frac{|\Pi C_1 + \Pi C_2 + \Pi C_3 + \Pi C_4 + \Pi C_5|}{2}, \quad (5)$$

где  $\Pi C_1$ ,  $\Pi C_2$ ,  $\Pi C_3$ ,  $\Pi C_4$ ,  $\Pi C_5$  вычисляются для пяти английских гласных, которые считаются вершинами многоугольника.

$$\begin{split} \Pi C_1 &= F_{1a} F_{20} - F_{10} F_{2a} \,; \\ \Pi C_2 &= F_{10} F_{2u} - F_{1u} F_{20} \,; \\ \Pi C_3 &= F_{1u} F_{2i} - F_{1i} F_{2u} \,\;; \\ \Pi C_4 &= F_{1i} F_{2e} - F_{1e} F_{2u} \,; \\ \Pi C_5 &= F_{1e} F_{2e} - F_{1e} F_{2e} \,. \end{split}$$

#### Результаты и их обсуждение

## Артикуляция в непрерывной речи

Возможности артикуляции пациентов в непрерывной речи оцениваются с учетом содержания энергии при переходе от невокализованных к голосовым сегментам (начало) и при переходе от невокализованных к голосовым сегментам (смещение). Основной гипотезой, которая мотивирует моделирование таких переходов в речи БП, является то, что пациенты с БП издают ненормальные невокализованные звуки и испытывают трудности с началом и / или остановкой вибрации голосовых связок. Это можно наблюдать на речевых сигналах путем моделирования частотного содержания невокализованных кадров и переходов между вокализованными и невокализованными звуками.

Чтобы вычислить эти показатели, основную частоту речевого сигнала оценивают c использованием граммного обеспечения Praat, предназначенного для обнаружения вокализо-

ванных и невокализованных сегментов. После этого обнаруживаются начала и смещения, и 40 мс сигнала анализирутся слева и справа от каждой границы. Наконец, спектр переходов распределяется по 22 критическим зонам по шкале Барка, и рассчитываются энергии полос Барк. Для частот ниже 500 Гц ширина полосы критических полос постоянна при 100 Гц, в то время как для средних и высоких частот приращение пропорционально логарифму частоты.

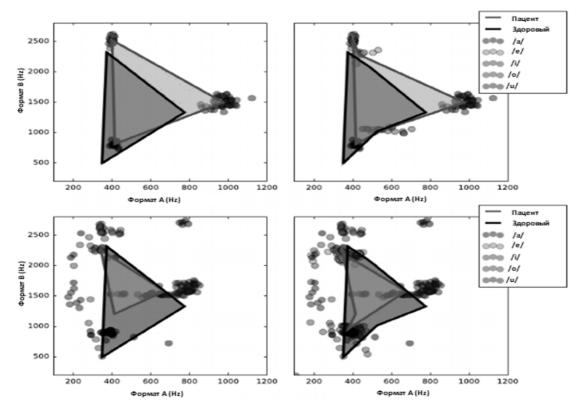
На рисунке 2 показаны вокальный треугольник и голосовой пятиугольник, полученные от здорового динамика (верхняя сторона) и для пациента с БП (нижняя сторона). При этом наблюдается уменьшение площади треугольника и пятиугольника для случая пациента с БП, по сравнению с областями, полученными для здоровых ораторов. Этот факт свидетельствует о снижении артикуляторных возможностей пациента. Отметим также, что частоты формант для каждого гласного более распространены для пациента с БП, чем для здорового оратора, что указывает на потерю контроля над языком и велюром, производя устойчивую фонацию.

#### Анализ разборчивости

Разумность связана со способностью человека быть понятым другим человеком или системой. У пациентов с неврологическими расстройствами ухудшается интеллект, и это приводит к потере их коммуникативных способностей и создает социальную изоляцию,

особенно на поздних стадиях заболевания. Таким образом, это важный маркер, который заслуживает внимания со стороны медицинских экспертов, лиц, осуществляющих уход, и пациентов. Чтобы помочь этим людям анализировать и контролировать речевое измере-

ние, этот инструмент включает в себя модуль для выполнения анализа разборчивости на основе нескольких речевых заданий, включая набор из десяти предложений, которые читает пациент, и текст, содержащий все английские звуки.



**Рис. 2**. Вокальный треугольник и пятиугольник для здорового оратора (вверх) и для пациента с БП (внизу)

**Fig. 2**. Vocal triangle and Pentagon for a healthy speaker (up) and for a patient with Parkinson's disease (down)

Для анализа разборчивости рассчитываются две меры — точность слова (TC) и мера подобия, основанная на динамическом искажении времени (РМП).

Точность слова (TC) была создана в качестве маркера для анализа производительности систем автоматический распознаватель речи и разборчивости

людей. Этот маркер был успешно использован для оценки разборчивости людей с другими видами нарушений речи, и авторы указывают, что ТС может быть хорошим дескриптором разборчивости речи у людей с патологическим голосом. ТС определяется как количество слов, правильно распознанных

системой автоматический распознаватель речи, относительно общего количества слов в исходной строке. Он рассчитывается в виде

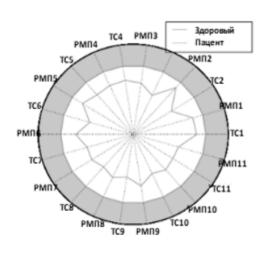
$$TC = \frac{\text{количество слов правильно распознано}}{\text{количество общих слов}}.$$
 (6)

Динамическое временное искажение (РМП) реализуется с целью анализа сходства между двумя временными рядами в том случае, когда обе последовательности могут иметь различия во времени и в количестве используемых выборок. Это достигается выравниванием по времени между последовательностями. Расстояние РМП вычисляется между предсказанной строкой и исходным предложением, прочитанным гово-

рящим. Расстояние вычисляется по тексту на уровне графемы, затем расстояние преобразуется в показатель сходства с использованием уравнения (7). Если последовательности одинаковы, расстояние РМП равно нулю и сходство будет равно 1.

$$PM\Pi = \frac{1}{1 + PM\Pi_{-pacctoshue}} \quad . \tag{7}$$

На рисунке 3 представлены радарные изображения, полученные для анализа разборчивости здорового говорящего (слева) и пациента с БП (БП). Наблюдается высокое снижение разборчивости пациента с БП по сравнению с показателем, полученным для здорового говорящего.



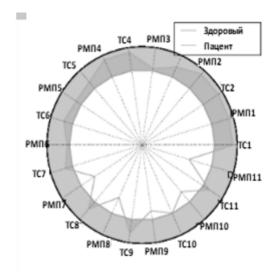


Рис. 3. Изображения радарного типа для здорового оратора (слева) и для пациента с БП (справа)

Fig. 3. Radar figure for a healthy speaker (left) and for a patient with PD (right)

#### Выводы

В этом исследовании рассмотрены способы анализа речевых сигналов у пациентов с болезнью Паркинсона и

полностью автоматизированный струмент, предназначенный для широкомасштабной оценки нарушений во время нейродегенерации при болезнях Паркинсона. Из-за повышенного интереса к приложениям анализа речевого паттерна БП для построения моделей, прогнозирующего теледиагностики и телемониторинга, были собраны 26 разнообразных образцов голоса и различных типов звука, включая устойчивые гласные, слова и предложения, составленные из набора речевых упражнений. В результате анализа набора данных, параллельно с результатами, представленными в литературе, было обнаружено, что устойчивые гласные несут больше информации, различающей БП, чем отдельные слова и короткие предложения.

#### Дальнейшие работы

В настоящее время не имеется доступных речевых данных о болезни Паркинсона на русском языке, поэтому

планируется провести эти исследования. В этом эксперименте мы будем использовать концепцию энергии последовательности, чтобы классифицировать речь на вокализованные и невокализованные кадры. Это достигается путем деления выбранного речевого сигнала на короткие кадры и вычисления средней мощности каждого кадра. Затем речь в конкретном кадре объявляется голосовой, если ее средняя мощность превышает пороговый уровень, выбранный пользователем. В противном случае он объявляется незваным. Вокализованные сигналы, как правило, громче, чем гласные / а /, / э /, / у /, / о / , / я /, / е /, / ю /. С другой стороны, невокализованные сигналы имеют тенденцию быть более резкими, как согласные стопа / б /, / й /, / х /.

#### Список литературы

- 1. Влияние нейрохирургического лечения болезни Паркинсона на характеристики речи и оромоторную функцию / А. Фаррелл, Теодорос, Э. Уорд, Б. Холл, П. Силберн // Journal of Speech, Language and Hearing Research. 2005. Т. 48, вып. 1. С. 5–20.
- 2. Даффи Дж. Р. Нарушения моторной речи: субстраты, дифференциальная диагностика и лечение. Сент-Луис: Мосби, 2013. С. 6–20.
- 3. Рисз Дж. Количественная оценка нарушений моторной речи при идиопатическом расстройстве поведения во сне в фазе быстрого сна // Sleep Med. 2016. № 19. С. 141–147.
- 4. Патофизиология двигательной дисфункции при болезни Паркинсона как обоснование медикаментозного лечения и реабилитации / Ф. Магринелли, А. Пичелли, П. Токко и [др. ]. 2015. С. 4-18.
- 5. Обзор окружающего интеллекта в здравоохранении / Дж. Акампора, Кук Джи, П. Рашиди, А. В. Василакос // Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. 2013. № 101 (12). С. 2470-2494.

- 6. Разработка прототипа информационно-аналитической системы исследования и развития когнитивных способностей лиц с инвалидностью / Т. В. Истомина, Е. В. Петрунина, А. Е. Никольский, И. А. Томакова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 11, № 3 (32). С. 28-43.
- 7. Обнаружение и мониторинг симптомов болезни Паркинсона с помощью смартфонов: пилотное исследование / С. Арора, В. Венкатараман, А. Жан, С. Донохью и [др. ]. // Паркинсонизм, связанный с расстройством. 2015. № 21 (6). С. 650-653.
- 8. Исследование mPower, мобильные данные о болезни Паркинсона, собранные с помощью ResearchKit / Б. Бот, Сивер, Е. Нето, М. Келлен и [др. ]. // Научные данные. 2016. № 3. C. 160011.
- 9. Даффи Р. Дж. Нарушения моторной речи: субстраты, дифференциальная диагностика и лечение. Сент-Луис: Elsevier Mosby, 2005. С. 13-15.
- 10. Рамки для прогнозирование мерцательной аритмии в электрофизиологических исследованиях / П. Вицца, Курчо, Г. Традиго, К. Индольфи и [др. ]. // Компьютерные методы и программы в биомедицине. 2015. № 120.2. С. 65-76.
- 11. Подход временных рядов для кластеризации данных масс-спектрометрии / Ф. Галло, Г. Понти, А. Тагарелли, Г. Традиго и [др.]. // Журнал вычислительной науки. 2012. № 3.5. С. 344-355.
- 12. Скодда С., Виссер В., Шлегель У. Артикуляция гласных при болезни Паркинсона болезнь // Журнал голоса. 2011. № 25 (4). С. 467-472.
- 13. Распознавание болезни Паркинсона по классификации акустических параметров речи / Д. Меграуи, Б. Боудраа, Т. Мерази-Мексе, М. Будраа // Моделирование и реализация сложных систем. Cham: Springer International Publishing, 2016. C.165-173.
- 14. Сравнение методов классификации для выявления болезни Паркинсона / А. Буруху, А. Джилбаб, К. Насир, А. Хаммуш // Международная конференция IEEE по электрическим и информационным технологиям (ICEIT) / Харбинский технологический институт. Харбин, 2016. С. 421-424.
- 15. Шарма Р. К., Гупта А. К. Обработка и анализ человеческого голоса для оценки болезни Паркинсона // Журнал медицинской визуализации и информатики здоровья. 2016. № 6 (1). C. 63-70.
- 16. Связь между голосовыми и двигательными нарушениями при болезни Паркинсона / Ф. Майдинасаб, С. Кархейран, М. Солтани, Н. Моради и [др.]. // Voice. 2015. C.131-140.
- 17. Инструмент для прогнозирования болезни Паркинсона с использованием методов интеллектуального анализа голосовых данных / Т. В. Шрирам, М. В. Рао,

- Г. С. Нараяна, Д. С. Каладхар и [др.]. // Международный журнал инженерных тенденций и технологий (IJETT). 2016. № 31 (3). С. 136-140.
- 18. Логопедические программы для системы автоматизированной терапии / С. Пентюк, Шипор, М. Данубяну, М. Шипор и [др.]. // Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng. 2010. № 103 (7). С. 87–90.
- 19. Озвученные невокализованные переходы в речи как потенциальный биомаркер для выявления болезни Паркинсона / Дж. Р. Орозко-Арройаве, Ф. Хениг, Дж. Д. Ариас-Лондоньо, Дж. Ф. Варгас-Бонилья и [др.]. // INTERSPEECH. Иска, 2015. С. 95–99.
- 20. Автоматическое обнаружение болезни Паркинсона при бегущей речи, на которой говорят на трех разных языках / Дж. Р. Орозко-Арройаве, Ф. Хениг, Дж. Д. Ариас-Лондоньо, Дж. Ф. Варгас-Бонилья и [др.]. // Soc. Am. 2016. № 139 (1). С. 481–500.
- 21. Орозко-Арройаве Дж. Р. Анализ речи людей с болезнью Паркинсона. Берлин: Логос Верлаг, 2016. С. 70-89.

#### Reference

- 1. Farrell A., Theodoros D., Ward E., Hall B., Silburn P. Vliyanie neirokhirur-gicheskogo lecheniya bolezni Parkinsona na kharakteristiki rechi i oromotornuyu funktsiyu [Effects of neurosurgical management of Parkinson's disease on speech characteristics and oromotor function]. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2005, vol. 48, no. 1, pp. 5–20, 2005. (In Russ.)
- 2. Duffy J. R. Narusheniya motornoi rechi: substraty, differentsial'naya dia-gnostika i lechenie [Motor Speech Disorders: Substrates, Differential Diagnosis and Management]. St. Louis Mosby, 2013, pp. 6–20. (In Russ.)
- 3. Rusz J. Kolichestvennaya otsenka narushenii motornoi rechi pri idiopatiche-skom rasstroistve povedeniya vo sne v faze bystrogo sna [Quantitative assessment of motor speech abnormalities in idiopathic REM sleep behaviour disorder]. *Sleep Med*, 19, 2016, pp. 141–147. (In Russ.)
- 4. Magrinelli F., Picelli A., Tocco P., eds. Patofiziologiya dvigatel'noi disfunktsii pri bolezni Parkinsona kak obosnovanie medikamentoznogo lecheniya i reabilitatsii [Pathophysiology of motor dysfunction in Parkinson's disease as a rationale for drug treatment and rehabilitation]. 2015, pp. 14-18. (In Russ.)
- 5. Acampora J, Cook Ji, Rashidi P., Vasilakos A. V. [Survey of Ambient Intelligence in Health Care]. *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng.*, 2013, no. 101 (12), pp. 2470-2494. (In Russ.)
- 6. Istomina T. V., Petrunina E. V., Nikolsky A. E., Tomakova I. A. Razrabotka prototipa informatsionno-analiticheskoi sistemy issledovaniya i razvitiya kognitivnykh sposobnostei

lits s invalidnost'yu [Development of a prototype of an information and analytical system for research and development of cognitive abilities of persons with disabilities]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2019, vol. 11, no. 3 (32), pp. 28-43. (In Russ.)

- 7. Arora S., Venkataraman V., Jean A., Donoghue S., eds. Obnaruzhenie i monitoring simptomov bolezni Parkinsona s pomoshch'yu smartfonov: pilotnoe issledovanie [Smartphone Detection and Monitoring of Parkinson's Disease Symptoms: A Pilot Study]. Parkinsonizm, svyazannyi s rasstroistvom = Parkinsonism associated with the disorder, 2015, no. 21 (6), pp. 650-3. (In Russ.)
- 8. Bot B., Seaver E., Neto E., Kellen M., eds. Issledovanie mPower, mobil'nye dannye o bolezni Parkinsona, sobrannye s pomoshch'yu ResearchKit [MPower study, mobile data on Parkinson's disease collected with ResearchKit]. Scientific data, 2016, no. 3, p. 160011. (In Russ.)
- 9. Duffy R. J. Narusheniya motornoi rechi: substraty, differentsial'naya diagnostika i lechenie [Motor speech disorders: substrates, differential diagnosis and treatment]. St. Louis, Elsevier Mosby, 2005, pp. 13-15. (In Russ.)
- 10. Vizza P., Curcio A., Tradigo G., Indolfi C., eds. Ramki dlya prognozirovanie mertsatel'noi aritmii v elektrofiziologicheskikh issledovaniyakh [Framework for the atrial fibrillation prediction in electrophysiological studies]. Komp'yuternye metody i programmy v biomeditsine = Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2015, no. 120.2, pp. 65-76. (In Russ.)
- 11. Gullo F., Ponti G., Tagarelli A., eds. Podkhod vremennykh ryadov dlya klasterizatsii dannykh mass-spektrometrii [A time series approach for clustering mass spectrometry data]. Zhurnal vychislitel'noi nauki = Journal of Computational Science, 2012, no. 3.5 pp. 344-355. (In Russ.)
- 12. Skodda S., Visser W., Schlegel U. Artikulyatsiya glasnykh pri bolezni Parkinsona bolezn' [Vowel articulation in Parkinson's disease]. Zhurnal golosa = Journal of Voice, 2011, no.25(4), pp. 467-472, (In Russ.)
- 13. Meghraoui D., Boudraa B., Merazi-Meksen T., Boudraa M. Raspoznavanie bolezni Parkinsona po klassifikatsii akusticheskikh parametrov rechi [Parkinsons Disease Recognition by Speech Acoustic Parameters Classification]. Modelirovanie i realizatsiya slozhnykh sistem [Modelling and Implementation of Complex Systems]. Cham, Springer International Publishing, 2016, pp. 165-173. (In Russ.)
- 14. Bourouhou A., Jilbab A., Nacir C., Hammouch A. Sravnenie metodov klassifikatsii dlya vyyavleniya bolezni Parkinsona [Comparison of classification methods to detect the Parkinson disease]. Mezhdunarodnaya konferentsiya IEEE po elektricheskim i infor-

matsionnym tekhnologiyam (ICEIT) [IEEE International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)]. Kharbin, Kharbinskii tekhnologicheskii institute, 2016, pp. 421-424. (In Russ.)

- 15. Sharma R. K., Gupta A. K. Obrabotka i analiz chelovecheskogo golosa dlya otsenki bolezni Parkinsona [Processing and analysis of human voice for assessment of Parkinson disease]. *Zhurnal meditsinskoi vizualizatsii i informatiki zdorov'ya = Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2016, no. 6(1), pp.63-70. (In Russ.)
- 16. Majdinasab F., Karkheiran S., Soltani M., Moradi N., eds. Svyaz' mezhdu golosovymi i dvigatel'nymi narusheniyami pri bolezni Parkinsona [Relationship Between Voice and Motor Disabilities of Parkinson's Disease]. *Voice*, 2015. (In Russ.)
- 17. Sriram T. V., Rao M. V., Narayana G. S., Kaladhar D. S., eds. Instrument dlya prognozirovaniya bolezni Parkinsona s ispol'zovaniem metodov intellektual'nogo analiza golosovykh dannykh [ParkDiag: A Tool to Predict Parkinson Disease using Data Mining Techniques from Voice Data]. *Mezhdunarodnyi zhurnal inzhenernykh tendentsii i tekhnologii (IJETT)* = *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2016, no. 31(3), pp.136-140. (In Russ.)
- 18. Pentiuc S., Schipor O., Danubianu M., Schipor M., eds. [Speech therapy programs for a computer aided therapy system]. Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng., 2010, no.103 (7), pp. 87–90. (In Russ.)
- 19. Orozco-Arroyave J. R., Hönig F., Arias-Londoño J. D., Vargas-Bonilla J. F., eds. [Voiced/unvoiced transitions in speech as a potential bio-marker to detect Parkinson's disease]. INTERSPEECH. ISCA, 2015, pp. 95–99. (In Russ.)
- 20. Orozco-Arroyave J. R., Hönig F., Arias-Londoño J. D., Vargas-Bonilla J. F., eds. Avtomaticheskoe obnaruzhenie bolezni Parkinsona pri begushchei rechi, na kotoroi govoryat na trekh raznykh yazykakh [Automatic detection of Parkinson's disease in running speech spoken in three different languages]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016, no.139 (1), pp. 481–500. (In Russ.)
- 21. Orozco-Arroyave J. R. Analiz rechi lyudei s bolezn'yu Parkinsona [Analysis of Speech of People with Parkinson's Disease]. Berlin, Logos Verlag, 2016, pp. 70-89. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the Authors

Орлова Юлия Александровна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

e-mail: yulia.orlova@gmail.com

**Yulia A. Orlova**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation,

e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Окороджи Дюк Филип Чике, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация e-mail: dukechike007@gmail.com

Розалиев Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Кузнецова Агнесса Сергеевна, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

agnessakyz@yandex.ru

Гилка Вадим Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация e-mail: gilka vv@mail.ru

Okoroji Duke Philip Chike. Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

e-mail: dukechike007@gmail.com

Vladimir L. Rozaliev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Agnessa S. Kuznetsova, Senior Lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Vadim V. Gilka, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation e-mail: gilka vv@mail.ru

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

#### SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING

Оригинальная статья / Original article

УДК 615.47; 616-085

# Биотехническая система персонифицированной магнитотерапии с комбинированной обратной связью

М. А. Ефремов<sup>1</sup>, С. А. Филист<sup>1</sup>, Д. С. Забанов<sup>1</sup>, М. Б. Мяснянкин<sup>1</sup>, Д. Ю. Савинов<sup>1</sup>

#### Резюме

**Цель исследования** заключается в повышении эффективности лечения инфекционных заболеваний посредством интеллектуального управления терапевтическим воздействием на органы-мишени с использованием биотехнических обратных связей.

**Методы.** Для управления терапевтическими воздействиями используется биотехническая система магнитотерапии с комбинированными обратными связями. Сущность комбинированных обратных связей состоит в том, что в качестве отрицательных обратных связей используются как сигналы с внутренних органов-мишений, так и сигналы с биоактивных точек, расположенных на доступных участках поверхности кожи. В процессе электромагнитного воздействия на орган-мишень модуль нечеткого управления формирует вектор управляющего воздействия, получаемый посредством нечеткого логического анализа сигналов датчиков комбинированной обратной связи. Вектор информативных признаков формируется так, чтобы оптимизировать терапевтический эффект электромагнитного поля.

**Результаты.** Для проверки эффективности магнитотерапии из выборки больных простатитом были созданы две группы — экспериментальная и контрольная. Для лечения больных в этих группах использовалась антибактериальная терапия. В экспериментальной группе больные получали также магнитотерапию. В экспериментальной группе у больных с острым течением патологического процесса по результатам исследования мазков секрета простаты на 2–3 дня раньше, чем в контрольной, значительно уменьшалось количество лейкоцитов и слизи и увеличивалось число лицетиновых зерен по сравнению с исходными показателями.

Заключение. По результатам исследований проведен анализ терапевтического эффекта лечения простатита в экспериментальной и контрольной группах. Оценка эффективности лечения осуществлялась на основе субъективных клинических исследований и результатов лабораторных и инструментальных исследований. При этом частота проявления патологических признаков после лечения снизилась в экспериментальной группе в среднем на 15% больше, чем у пациентов контрольной группы.

© Ефремов М. А., Филист С. А., Забанов Д. С., Мяснянкин М. Б., Савинов Д. Ю., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

**Ключевые слова:** магнитотерапия; нечеткое управление; биотехническая обратная связь; биологически активные точки; датчик температуры; фотоплетизмосигнал.

**Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Биотехническая система персонифицированной магнитотерапии с комбинированной обратной связью / М. А. Ефремов, С. А. Филист, Д. С. Забанов, М. Б. Мяснянкин, Д. Ю. Савинов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 84—101.

Поступила в редакцию 01.04.2020

Подписана в печать 30.04.2020

Опубликована 25.05.2020

# Biotechnical System of Personalized Magnetotherapy with Combined Feedback

# Mihail A. Efremov<sup>1</sup>, Sergey A. Filist<sup>1</sup>, Dmitry S. Zabanov<sup>1</sup>, Maksim B. Myasnyankin<sup>1</sup>, Denis Yu. Savinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk, 305040, Russian Federation

#### **Abstract**

**The purpose of the research** is to increase the effectiveness of the treatment of infectious diseases through intellectual control of the therapeutic effect on target organs using bioengineering feedbacks.

**Methods.** To control therapeutic effects biotechnical system magnetic therapy with combined feedbacks is used. The essence of the combined feedbacks is that both signals from internal target organs and signals from bioactive spots on traversable parts of the surface of the skin are used as negative feedbacks. In the process of electromagnetic influence on the target organ the fuzzy control module generates a control action vector, which is obtained through fuzzy logic analysis of the signals of the combined feedback sensors. The informative features vector is generated to optimize the therapeutic effect of the electromagnetic field.

**Results.** To test the effectiveness of magnetic therapy, two groups were created from a sample of patients with prostatitis: a test group and a control group. For the treatment of patients in these groups, antibiotic therapy was used. The patients in the test group also received magnetotherapy. According to the results of the prostate secretion smear analysis, the number of leukocytes and mucus in the patients of the test group decreased significantly 2-3 days earlier than in the patients of the control group, and the number of lecithin grains increased compared to the baseline.

**Conclusion.** The therapeutic effect of the treatment of prostatitis in the test and control groups was analyzed based on the research results. The assessment of treatment efficiency was based on subjective clinical studies and the results of laboratory and instrumental studies. The frequency of occurrence of symptoms after treatment decreased in the test group, on average, 15% more than in the control group.

**Keywords:** magnetotherapy; fuzzy control; biotechnical feedback; biologically active spots; temperature sensor; photoplethysmosignal.

**Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Efremov M. A., Filist S. A., Zabanov D. S., Myasnyankin M. B., Savinov D. Yu. Biotechnical System of Personalized Magnetotherapy with Combined Feedback. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020; 10(2): 84–101. (In Russ.)

Received 01.04.2020

Accepted 30.04.2020

Published 25.05.2020

#### Введение

Одной из актуальных задач цифровой медицины является разработка и внедрение эффективных систем поддержки принятия решений, которые, используя методы интеллектуального анализа данных, помогают врачам в задачах постановки диагнозов, оценки эффективности лечения и т. д. Особый интерес представляет мониторинг эффективности терапевтических электромагнитных воздействий внутренних органов человека при лечении инфекционных и онкологических заболеваний. При такой терапии часто используются хаотические электромагнитные колебания в звуковом частотном диапазоне, однако при этом возникает необходимость как обеспечения его хаотического воздействия на орган-мишень, так и управления его параметрами с целью оптимизации терапевтического эффекта [1; 2; 3].

#### Материалы и методы

# Средства управления магнитотерапией

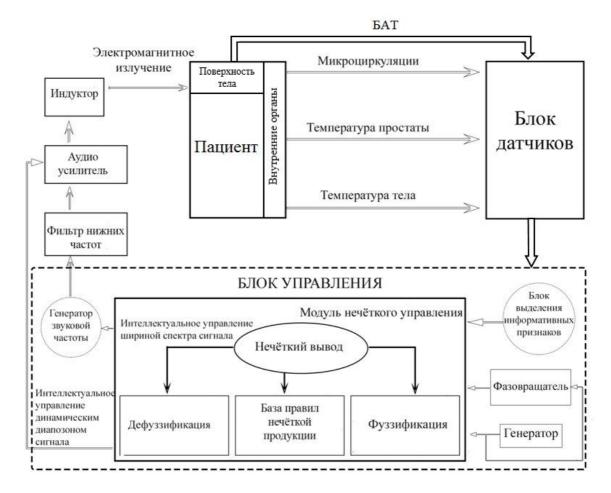
Для оптимизации терапевтического воздействия на внутренние органы предлагается использовать комбинированную биотехническую обратную связь (БТОС) и модуль нечеткого управления (МНЧУ). Структурная схе-

ма биотехнической системы (БТС) с включенными в ее состав модулями БТОС и МНЧУ представлена на рисунке 1. Магнитотерапия, осуществляемая этой системой, включает курсовое воздействие электромагнитным излучением на предстательную железу после эндоректального ввода аппликатора (рис. 2). Внутри аппликатора находится катушка индуктивности, которая являтерапевтического ется источником электромагнитного поля. С катушкой индуктивности соединен генератор звуковой частоты (ГЗЧ). Для снижения нелинейных искажений сигнал с ГЗЧ проходит через фильтр нижних частот. Интенсивностью электромагнитных колебаний управляют посредством аудиусилителя. Вектор состояния объекта управления формируем посредством датчиков фотоплетизмограммы (ФПГ) и датчиков температуры, установленных на аппликаторе [1].

Для управления магнитотерапией используются суррогатные маркеры, посредством которых осуществляется отрицательная обратная связь по электромагнитному воздействию на органмишень. Для управления магнитотерапией в литературе описаны множество суррогатных маркеров, таких как параметры межклеточных соотношений, ар-

териальное давление, температура и т. д. [3; 4; 5; 6]. При магнитотерапии по результатам метаанализа в качестве суррогатных маркеров используем ре-

зультаты мониторинга фотоплетизмограммы (ФПГ) [7], температуры [7] и биоимпеданса биоактивных точек (БАТ) [8; 9].



**Рис. 1**. Структурная схема биотехнической системы для интеллектуального управления магнитотерапией внутренних органов человека

**Fig. 1**. Block diagram of the biotechnical system for intelligent control of magnetotherapy of human internal organs

Сущность комбинированной обратной связи состоит в том, что в обратных связях используются как сигналы от внутренних органов, так и сигналы от БАТ, расположенных на доступных участках поверхности кожи [10; 11; 12]. Датчики биотехнической обратной связи устанавливались на аппликаторе, предназначенном для эндоректального

ввода. При этом часть датчиков установлены на аппликаторе дистально и используются для получения индифферентных сигналов (см. рис. 2).

Для построения канала обратной связи по сигналам, снимаемым с поверхности кожи, использовались модели вольт-амперных характеристик (ВАХ) БАТ, дислокация которых опре-

делялась посредством известных методов диагностики [13; 14; 15]. Для реализации БТОС по реакции БАТ использовались БАТ трех меридианов: меридиана сердца — С7, меридиана легких — Р9, меридиана перикарда — МС7 [8; 11].

Сущность управления состоит в следующем. Данные ФПГ, датчиков температуры и биоимпеданса БАТ оцифровываются в блоке датчиков и поступают в блок управления (см. рис. 1). Блок управления выполняет две функции: а) создает хаотическое электромагнитное поле; б) управляет частотным диапазоном и интенсивностью хаотического электромагнитного поля.

Для создания хаотического магнитного поля используется генератор и фазовращатель блока управления. Они формируют два синусоидальных сигнала, сдвинутые по фазе, которые предназначены для модуляции частоты ГЗЧ и коэффициента усиления аудиусилителя. Это позволяет в фиксированный дискрет времени полудва псевдослучайных числа, определяющих частоту и интенсивность электромагнитного поля. Для управления этими двумя числами посредством БТОС модуль МНЧУ формирует свои два числа, которые модулируют две синусоиды, поступающие с генератора и фазовращателя. Таким образом, посредством МНЧУ устанавливается частотный диапазон и динамический диапазон аудиусилителя.

## Методика управления магнитотерапией посредством БТОС

При магнитотерапии простатита использовался аппликатор аппарата УЛП-01-ЕЛАТ [1]. На аппликаторе имеется технологическое плато, которое было использовано для установки инфракрасного излучателя и приемника инфракрасного излучения. Датчик ФПГ размещен вдоль области аппликатора (см. рис. 2), приблизительно по центру технологического уклона у конца аппликатора (над простатой), при этом не значения последовательность «фототранзистор-светодиод» или «светодиод-фототранзистор» относительно концевой части аппликатора.

Аппликатор (см. рис. 2) после ректального ввода устанавливается в окрестности предстательной железы, снимается ФПГ посредством пары светодиод-фотодиод, установленной на плато аппликатора (рис. 2), определяются статистические параметры информативных признаков, и по их показателям МНЧУ корректируется терапевтическое магнитное поле.

Динамический диапазон ГЗЧ и аудиоусилителя формируется МНЧУ на основе анализа датчиков БТОС. Предложены архитектурные решения МНЧУ, включая модели фуззификатора, блока дефуззификации, а также комплект решающих правил, составляющих основу МНЧУ, имеющих иерархическую структуру, которая построена на основе анализа чувствительности суррогатных маркеров к электромагнитному воздействию [16; 17].

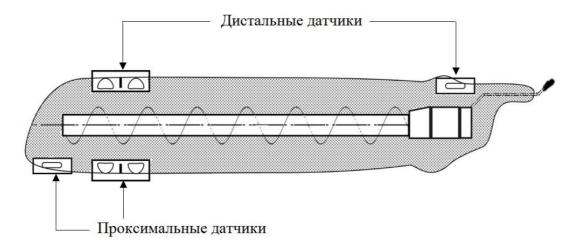


Рис. 2. Схема расположения датчиков регистрации ФПГ и температуры на аппликаторе

Fig. 2. Diagram of the arrangement of PPG and temperature sensors on the applicator

С помощью первого (основного) и второго (индифферентного) датчиков температуры измерялась температура в окрестности простаты и в индифферетной точке (см. рис. 2). В качестве датчика температуры использовалась интегральная микросхема серии HTU21D фирмы ТЕ Connectivity, которая обеспечивает максимальную разрешающую способность измерения температуры до 0,01°C.

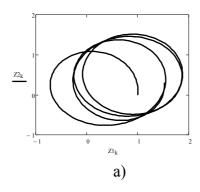
Сеанс магнитотерапии проводят в течение 10 мин. Эффективность магнитотерапии определялась как в процессе сеанса, так и после, по результатам

сравнения объективных показателей от сеанса к сеансу. Пример результатов мониторинга магнитотерапии пациента по показателю «изменение температуры в анатомической области интереса» представлен в таблице 1. При повышении температуры в области простаты на 0,6...0,9 °C делают вывод о высокой эффективности магнитотерапии, при повышении температуры на 0,2...0,5 °C – о средней эффективности, при изменении температуры на 0...0,2 °C – о низкой эффективности, а при понижении температуры до 0,5 °C – об инверсионной магниточувствительности.

**Таблица 1**. Мониторинг температуры основного и индифферентного датчиков **Table 1**. Results of monitoring the temperature of main and indifferent sensors

Время магнитотерапии, мин	Основной датчик, °С	Индифферентный датчик, °С
0	35,20	35,00
3	35,25	35,10
6	35,30	35,10
9	35,60	35,20
После магнитотерапии	35,80	35,20

Для создания хаотических электромагнитных воздействий коэффициент усиления аудиоусилителя меняется по линейному или синусоидальному закону от нуля до максимума. При этом сигнал с ГЗЧ пробегает всю линейку частотного диапазона от  $\Omega_{\min}...\Omega_{\max}$  с заданным шагом дискретизации по частоте и с «замиранием» на каждой дискретной частоте на определенный временной дискрет. В итоге на фазовой плоскости в координатах (Z1, Z2) будем наблюдать замкнутую кривую (окружность, эллипс и т. п.), вписанную в прямоугольник co сторонами  $(\Omega_{\text{max}}$  -  $\Omega_{\text{min}})$  и  $(K_{\text{max}}$  -  $K_{\text{min}}$ ). МНЧУ имеет возможность перемещать центр описанного прямоугольника в системе координат (Z1, Z2) в зависимости от результатов магнитотерапии, т. е. в зависимости от показаний датчиков БТОС. На рисунке 3,а представлен пример такого перемещения в декартовых координатах. Очевидно, что форма фазовой траектории определяет энергетическое воздействие электромагнитного поля на соответствующий анатомический орган. В данной БТС в процессе магнитотерапии возможно управление частотным диапазоном  $\Gamma$ 3Ч и динамическим диапазоном  $\Gamma$ 4



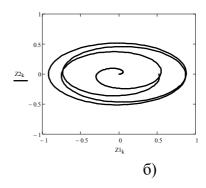


Рис. 3. Фазовая плоскость, иллюстрирующая процесс управления магнитотерапией: а – смещение центра описанного четырехугольника; б – расширение динамического диапазона аудиусилителя и частотного диапазона ГЗЧ

Fig. 3. Phase plane illustrating the process of magnetic therapy control: a – displacement of the center of the described quadrangle;  $\delta$  – expansion of the dynamic range of the audio amplifier and the frequency range of the AFG

Для того чтобы МНЧУ мог управлять параметрами магнитотерапии согласно рисунку 3, необходимо ввести соответствующие лингвистические переменные и построить соответствующие функции принадлежности. Имеем четыре канала управления. Первые два

канала управляют границами динамического диапазона частоты, вторые два – границами динамического диапазона коэффициента усиления. Таким образом, имеем возможность получить хаотические траектории на фазовой плоскости. При этом движение точки на

фазовой плоскости определяется законом изменения частоты и коэффициента усиления в этих динамических диапазонах.

МНЧУ анализирует информацию от датчиков БТОС и в зависимости от их показаний управляет терапевтическим магнитным полем. Так как между акцией и реакцией биообъекта имеется

временной лаг, то у лингвистической переменной соответствующего канала управления должно быть несколько термов, соответствующих переходным значениям параметров управления. Так лингвистические переменные на выходе каналов МНЧУ принимают значения, представленные ниже (табл. 2).

**Таблица 2**. Значения термов лингвистической переменной на выходе МНЧУ **Table 2**. Values of the terms of the linguistic variable at the output of the FCM

Терм	Обозначение	Диапазон
Уменьшить	M	-512128
Не изменять	S	-384384
Увеличить	D	128512

Таким образом, на выходе фуззификатора (входе блока нечеткого вывода) имеем лингвистические переменные, которые характеризуют изменение суррогатных маркеров в процессе магнитотерапии, на входе — числовую переменную, которая характеризует величину суррогатного маркера или его изменение по сравнению с предыдущим дискретом времени. Полученные функции принадлежности для одного суррогатного маркера МНЧУ для трех термов лингвистической переменной представлены ниже (рис. 4).

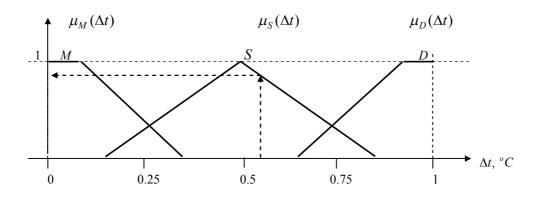


Рис. 4. Функции принадлежности суррогатного маркера

Fig. 4. Membership functions of the surrogate marker

Нечеткое решающее правило (НЧРП) извлекается из базы НЧРП,

входящей в состав МНЧУ, и определяет степень необходимости изменения па-

раметров управления терапевтическим электромагнитным полем. Эти изменения зависят от состояния контролируемых посредством БТС суррогатных маркеров в текущей и предшествующей временных дискретах. НЧРП формируется экспертом и модифицируется в процессе эксплуатации БТС. Минимальное число НЧРП определяется числом используемых для организации управления электромагнитным полем суррогатных маркеров. Функции принадлежности (рис. 4) также строятся посредством экспертной оценки и корректируются в процессе эксплуатации БТС.

В НЧРП осуществляется последовательная проверка возможных сочета-

ний лингвистических переменных, соответствующих значениям суррогатных маркеров, в текущей и предшествующей дискретах управления. Эти комбинации в НЧРП выстраиваются согласно приоритетам, определяемым чувствительностью суррогатного маркера к терапевтическому электромагнитному полю. Выбор управленческих решений осуществляется посредством просмотра базы НЧРП [1; 2].

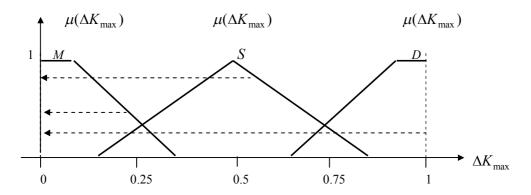
При формировании НЧРП исходили из анализа реакции суррогатного маркера на определенную акцию. Например, для канала управления  $K_{\text{max}}$  блок НЧРП может иметь следующий вид:

 $T1: Ecлu ((\Delta t(T1)=S \ U \ \Delta K_{\max}(T0)=D) \ TO (Ecлu \ K_{\max} < 512 \ TO \ \Delta K_{\max} = D)) \ UHA \ YE...,$   $Ecлu ((\Delta MC(T1)=D \ U \ \Delta K_{\max}(T0)=D) \ TO (Ecлu \ K_{\max} > 512 \ TO \ \Delta K_{\max} = M)) \ UHA \ YE...,$  (1)  $Ecлu ((\Delta R(T1)=D \ U \ \Delta K_{\max}(T0)=D) \ TO (TO \ \Delta K_{\max} = S)) \ UHA \ YE...,$ 

где T1 — текущий дискрет управления; T0 — предыдущий дискрет управления;  $\Delta t(T1) = t(T1) - t(T0)$  — изменение температуры между временными дискретами,  $\Delta MC(T1) = MC(T1) - MC(T0)$  — изменение параметра микроциркуляций между временными дискретами,  $\Delta R(T1) = R(T1) - R(T0)$  — изменение электрического сопротивления БАТ между временными дискретами.

Если в НЧРП (1) выполняются первые условия, то следующее управляющее воздействие в канале  $K_{\text{max}}$  определяется по функциям принадлежности, показанным ниже (рис. 5).

По чувствительности суррогатных маркеров к электромагнитному излучению на орган-мишень выделены следующие случаи: 1) «хорошая чувствительность»; 2) «плохая чувствительность»; 3) «парадоксальная чувствительность». Ситуация «срыв управления» соответствует случаю, когда задача управления не решается в рамках данного блока НЧРП и предусматривает выход в интерактивный режим с последующим уточнением или модификацией НЧРП, изменением спектрального состава электромагнитного излучения.



**Рис. 5**. Функции принадлежности для управления  $K_{\text{max}}$ 

Fig. 5. Membership functions for controlling  $K_{max}$ 

### Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности магнитотерапии созданы экспериментальная и контрольная группа пациентов с хроническим простатитом (табл. 3). Для лечения больных в этих группах использовалась антибактериальная тера-

пия, соответстветствующая характеру и чувствительности микрофлоры по данным бактериальных посевов. В экспериментальной группе больные получали магнитотерапевтическое воздействие, а в контрольной – нет.

**Таблица 3**. Распределение больных хроническим бактериальным простатитом по возрасту

**Table 3**. Distribution of patients with chronic bacterial prostatitis by age

Группа	Эксп	еримента	льная	Контрольная			
Возраст, лет	18-40 41-50 51-60			18-40	41-50	51-60	
Количество больных	21	6	3	19	8	3	
Итого	30			30			

С пациентами экспериментальной и контрольной группы перед началом и после лечения проводились как субъективные (жалобы, осмотры), так и объективные (лабораторные и инструментальные) исследования. Хорошим результатом лечения считалась положительная динамика субъективных и объективных факторов.

Субъективные результаты исследований выражались в баллах — от нуля (нет симптомов заболевания) до трех (сильно выраженные симптомы). В таблице 4 и в таблице 5 приведены примеры такой оценки в экспериментальной и контрольной группах на примерах симптома болезненного мочеиспускания и болевого синдрома, соответственно.

**Таблица 4**. Распределение выраженности частого, болезненного мочеиспускания у пациентов экспериментальной и контрольной групп в баллах до и после окончания лечения

**Table 4**. Distribution of the severity of frequent, painful urination in patients of the experimental and control groups in points before and after the end of treatment

Голиг		До ле	ечения	I	После лечения			
Баллы	0	1	2	3	0	1	2	3
Экспериментальная группа	0	4	16	8	15	13	0	0
Контрольная группа	0	4	16	10	10	16	4	0

**Таблица 5**. Распределение выраженности болевого синдрома у пациентов экспериментальной и контрольных группах в баллах до и после окончания лечения

**Table 5**. Distribution of the severity of pain syndrome in patients of the experimental and control groups in points before and after the end of treatment

Гания		До ле	ечения	Į.	После лечения			
Баллы	0	1	2	3	0	1	2	3
Экспериментальная группа	0	8	15	5	14	12	2	0
Контрольная группа	0	12	14	4	9	11	9	1

Анализ динамики лечения в экспериментальной и контрольной группах показал, что регистрация уменьшения болевого синдрома у пациентов экспериментальной группы была зафиксирована на 3—4 дня раньше, чем у пациентов контрольной группы, что является одним из подтверждающих факторов эффективности магнитотерапии с комбинированной биотехнической обратной связью.

У всех пациентов экспериментальной и контрольной групп до начала лечения фиксировалось увеличение и болезненность предстательной железы

(ПЖ). В результате контроля динамики лечения была выявлено, что при остром течении заболевания размеры и болезненность железы в экспериментальной группе уменьшились или исчезли на 4–5 дней раньше, чем в у пациентов в контрольной. В экспериментальной группе по результатам исследования мазков секрета ПЖ на 2–3 дня раньше, чем в контрольной, значительно уменьшалось количество лейкоцитов, слизи и увеличивалось число лицетиновых. Побочных эффектов или проявлений при магнитотерапии разрабо-

танным способом отмечено не было. Анализ результатов лечения пациентов

из экспериментальной и контрольной групп приведен ниже (табл. 6).

**Таблица 6**. Клинико-лабораторные показатели у больных хроническим простатитом до и после комплексного лечения с использованием магнитотерапии с комбинированной биотехнической обратной связью

**Table 6**. Clinical and laboratory parameters of patients with chronic prostatitis before and after complex treatment using magnetotherapy with combined biotechnical feedback

	Частота появления признаков								
Клинико-лабораторные показатели	Экс	перим	енталь	ная	Контрольная группа				
		гру	ппа						
	до лечения		после лече-		до лечения		после лече-		
				<b>Р</b> ИН				RИН	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	
Количество больных	28	100	28	100	30	100	30	100	
Психоневрологические симптомы	18	64	9	32	20	67	13	43	
Общее недомогание (субфебриль-	7	25	0	0	6	20	2	7	
ная температура, головные боли)	/	23	U	U	U	∠U 	2	,	
Боли (в промежности, в паху, над	18	64	2	8	20	67	5	17	
лобком, в яичках)	10	04	2	0	20	07	)	1 /	
Рези при мочеиспускании	18	64	0	0	22	73	3	10	
Чувство покалывания в уретре	2	7	0	0	3	10	3	10	
Зуд в области уретры	0	0	0	0	2	7	1	3	
Выделения из уретры	21	75	0	0	18	60	4	13	
Повышенная частота мочеиспус-	21	75	4	16	17	57	7	23	
кания	21	75	•	10	1 /	37	,	23	
Снижение потенции	4	14	0	0	3	10	1	3	
Лейкоциты: сплошные в поле зре-	9	32	0	0	8	27	3	10	
ния	7	32	U	U	O	21	)	10	
31-50	4	14	0	0	6	20	1	3	
13-30	2	7	0	0	3	10	2	7	
0-12	11	39	28	100	10	33	30	100	

Исследовались показатели васкуляризации и гемодинамики до и после магнитотерапии хронического простатита.

Таблица 7 на примере одного пациента показывает, что объективные показатели свидетельствуют о том, что курсовое ле-

чение с использованием магнитотерапии с комбинированной биотехнической обратной связью приводит к увеличению таких показателей, как пиковая линейная скорость, диаметр сосудов в центральной и перефирической зонах, и средней плот-

ности сосудистого сплетения. Тогда как значение пульсационного индекса и индекса резистентности существенно не изменились. Такая тенденция сохраняется по всем пациентам экспериментальной и контрольной групп.

**Таблица 7**. Показатели васкуляризации и гемодинамики предстательной железы больного В

**Table 7**. Indicators of vascularization and hemodynamics of the prostate gland of patient B

	До леч	ения	После лечения		
Параметры	центральная	перифе-	центральная	периферич.	
	зона	рич. зона	зона	зона	
Линейная пиковая скорость, см/сек	10,9	-	11,0	11,7	
Линейная диастолическая скорость,	5,1	_	5,0	4,7	
см/с	3,1	_	5,0	7,7	
Линейная средняя скорость, см/сек	7,5	-	7,6	7,6	
Пульсационный индекс, у. е.	0,76	-	0,83	0,9	
Индекс резистентности, у. е.	0,52	-	0,5	0,59	
Диаметр сосудов, см	0,075	-	0,075	0,062	
Объемный кровоток, л/мин	0,035	-	0,036	0,025	
ПСС, сосуд/см	1,84	0,84	2,21	1,51	

Было установлено, что эти показатели улучшались более равномерно у пациентов экспериментальной группы. Кроме того, у пациентов экспериментальной группы показатели гемодинамики в сосудах в окрестности ПЖ устанавливались в норму независимо от степени поражения ПЖ.

#### Выводы

По результатам исследований проведен анализ терапевтического эффекта лечения простатита в экспериментальной и контрольной группах. В экспериментальной группе дополнительно к антибакте-

риальной терапии осуществлялась магнитотерапия с комбинированной БТОС. Оценка эффективности лечения осуществлялась на основе субъективных клинических исследований и результатов лабораторных и инструментальных исследований. Гипотеза на принадлежность выборок по экспериментальной и контрольной группам после курсового лечения к одной и той же генеральной совокупности была отвергнута на уровне 0,06 на основе критерия Джонхиера. При этом частота проявления патологических признаков после лечения в экспериментальной группе снизилась в среднем на 15%

больше, чем у пациентов контрольной группы.

Под действием магнитного поля нормализовались эластичность и тонус сосудов. Диаметр артерий и капилляров, скорость кровотока в них, плотность сосудистого сплетения в зонах ишемии, а также объемный кровоток увеличивались почти равномерно.

Субъективная оценка лечения в этих двух группах показала, что использование комбинированной биотехнической обратной связи позволило устранить болевой синдром в области мочевого пузыря и промежности у пациентов экспериментальной группы на 4—5 дней раньше, чем у пациентов контрольной группы.

#### Список литературы

- 1. Филист С. А., Забанов Д. С., Трифонов А. А. Магнитотерапия простатита с биологической обратной связью по оптическому каналу связи // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: докл. XIII Межд. научн. конф. М.: Графика, 2018. Кн. 1. С. 147-153.
- 2. Филист С. А., Кузьмин А. А., Мешковский Д. В. Магнитотерапевтический аппарат с адаптируемым спектром электромагнитного излучения для лечения простатита и гинекологических заболеваний // Медицинская техника. 2008. № 4. С.20-24.
- 3. Пат. 2012234 Российская Федерация, МПК А61В8/06. Способ определения эффективности магнитотерапии при лечении цереброваскулярных заболеваний / Мясников И. Г., Сорокина Г. А.; заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный медицинский институт. Заявл. 11.06.90; опубл. 15.05.94.
- 4. Алгоритмы метаанализа эффективности диагностических и терапевтических решений на основе мониторинга суррогатных маркеров, получаемых по результатам анализа сложноструктурируемых изображений / С. А. Филист, А. Г. Курочкин, А. А. Кузьмин [и др. ] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 4 (21). С. 41-55.
- 5. Курочкин А. Г., Шкатова Е. С., Шуткин А. Н. Многоуровневый метаанализ для прогнозирования функционального состояния по суррогатным маркерам // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. Вып. 9. С. 25-31.
- 6. Гибридные многоагентные классификаторы в биотехнических системах диагностики заболеваний и мониторинге лекарственных назначений / М. А. Ефремов, О. В. Шаталова, В. В. Федянин, А. Н. Шугкин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2015. № 6. С. 42-47.
- 7. Система коррекции функционального состояния организма человека на основе медицинского мониторинга параметров внутренних органов / К. В. Подмастерьев, Д. С. Забанов [и др.] // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сб. статей по материалам IV Всерос. научн.-практ. конф. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2019. Ч.1. С. 186-191.

- 8. Моделирование влияния электрокардиосигнала на оценку динамической составляющей биоимпеданса / А. А. Мохаммед, О. В. Шаталова, А. М. Аль-Кдаси, В. Н. Снопков // Медицинская техника. 2013. № 4 (280). С. 30-32.
- 9. Исследование проводимости биоматериалов в биоактивных точках при циклических воздействиях токами различной полярности / С. Е. Суржикова, Ю. Б. Мухатаев, О. В. Шаталова [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. Вып. 9. С. 32-36.
- 10. Филист С. А., Шаталова О. В., Богданов А. С. Модели биоимпеданса при нелинейной вольт-амперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала // Бюллетень сибирской медицины. 2014. Т. 13, № 4. С. 129-135.
- 11. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах invivo // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38-42.
- 12. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах invivo // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т.9, № 1 (30). С. 26-38.
- 13. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / С. Е. Суржикова, С. А. Филист, В. В. Жилин, А. Г. Курочкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3. С. 85-95.
- 14. Филист С. А. Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35-39.
- 15. Шаталова О. В. Ассоциации решающих модулей в интеллектуальных системах прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 153-162.
- 16. Слабые классификаторы с виртуальными потоками в интеллектуальных системах прогнозирования сердечно-сосудистых осложнений / А. Киселев, О. Шаталова, Е. Петрунина [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 6-19.
- 17. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа З. Д. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4(43), ч. 2. С. 44-50.

#### Reference

1. Filist S. A., Zubanov D. S., Trifonov A. A. [Magnetotherapy of prostatitis with biological feedback via the optical communication channel]. Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii. Doklady XIII Mezhd. nauchn. konf. [Physics and radio electronics in medi-

cine and ecology. Reports of the XIII int. Scientific Conf.]. Moscow, Grafika, 2018, pp. 147-153. (In Russ.)

- 2. Filist S. A., Kuzmin A. A., Meshkovsky D. V. Magnitoterapevticheskii ap-parat s adaptiruemym spektrom elektromagnitnogo izlucheniya dlya lecheniya prostatita i ginekologicheskikh zabolevanii [Magnetotherapy apparatus with an adaptable range of electromagnetic radiation for the treatment of prostatitis and gynecological diseases]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*, 2008, no. 4, pp. 20-24. (In Russ.)
- 3. Myasnikov I. G., Sorokina G. A. Sposob opredeleniya effektivnosti magnitoterapii pri lechenii tserebrovaskulyarnykh zabolevanii [Method of determining the effectiveness of magnetotherapy in the treatment of cerebrovascular diseases]. Patent RF, no. 2012234, 1994. (In Russ.)
- 4. Filist S. A., Kurochkin A. G., Kuzmin A. A., eds. Algoritmy meta-analiza effektivnosti diagnosticheskikh i terapevticheskikh reshenii na osnove monitoringa surrogatnykh markerov, poluchaemykh po rezul'tatam analiza slozhnostrukturiruemykh izobrazhenii [Algorithms of meta-analysis of the effectiveness of diagnostic and therapeutic decisions on the basis of monitoring of surrogate markers resulting from the analysis of hard-to-construct images]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2016, no. 4 (21), pp. 41-55. (In Russ.)
- 5. Kurochkin A. G., Skatova E. S., Shutkin A. N. Mnogourovnevyi metaanaliz dlya prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya po surrogatnym markeram [Multi-level meta-analysis aimed at predicting the functional state based on surrogate markers]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radio electronics*, 2016, vol. 9, pp. 25-31. (In Russ.)
- 6. Efremov M. A., Shatalova O. V., Fedyanin V. V., Shutkin A. N. Gibridnye mnogoagentnye klassifikatory v biotekhnicheskikh sistemakh diagnostiki zabolevanii i monitoringe lekarstvennykh naznachenii [Hybrid multi-agent classifiers in biotechnical applications for disease diagnosis and medicine appointment monitoring]. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: development, application,* 2015, no. 6, pp. 42-47. (In Russ.)
- 7. Podmasteryev K. V., Sabanov D. S., eds. [A system of correction of the functional state of human body based on medical monitoring of the parameters of the internal organs]. Iskusstvennyi intellekt v reshenii aktual'nykh sotsial'nykh i ekonomicheskikh problem XXI veka. Sb. statei po materialam IV Vseros. nauchn.-prakt. konf. [Artificial intelligence in addressing the pressing social and economic problems of the XXI century. Collection of articles on materials of the Fourth all-Russian scientific-practical Conf.]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2019, pt. 1. pp. 186-191. (In Russ.)
- 8. Mohammed A. A., Shatalova O. V., Al- Kdasi A. M., Snopkov V. N. Modelirovanie vliyaniya elektrokardiosignala na otsenku dinamicheskoi so-stavlyayushchei bioimpedansa [Modeling of the influence of an electronic cardiosignal on the assessment of the dynamic

- component of bioimpedance]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*, 2013, no. 4 (280), pp. 30-32. (In Russ.)
- 9. Surzhikova S. E. Mukataev Y. B., Shatalova O. V., eds. Issledovanie provodimosti biomaterialov v bioaktivnykh tochkakh pri tsiklicheskikh vozdeistviyakh tokami razlichnoi polyarnosti [A study of the conductivity of biomaterials in bioactive spots under cyclic impact of currents of different polarity]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical electronics*, 2016, vol. 9, pp. 32-36. (In Russ.)
- 10. Filist S. A., Shatalova O. V., Bogdanov A. S. Modeli bioimpedansa pri ne-lineinoi vol't-ampernoi kharakteristike i obratimom proboe dielektricheskoi sostavlyayushchei biomateriala [Models of bioimpedance with a nonlinear current-voltage characteristics and reversible breakdown of the dielectric component of the biomaterial]. *Byulleten' sibirskoi meditsiny = Bulletin of Siberian medicine*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 129-135. (In Russ.)
- 11. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmin M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentakh invivo [Biotechnical system for monitoring impedance of biomaterials in invivo experiments]. *Biomeditsinskaya radioelektronika* = *Biomedical electronics*, 2014, no. 9, pp. 38-42. (In Russ.)
- 12. Shatalova O. V. Iteratsionnaya mnogoparametricheskaya model' bioimpedansa v eksperimentakh invivo [Iterative multivariable model of bioimpedance in invivo experiments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 26-38. (In Russ.)
- 13. Surzhikova S. E., Filist S. A., Zhilin V. V., Kurochkin A. G. Ispol'zovanie gibridnykh neirosetevykh modelei dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [The use of hybrid neural network models for multiagent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian journal: management and high technology*, 2015, no. 3, pp. 85-95. (In Russ.)
- 14. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neironnaya set's makrosloyami dlya meditsinskikh prilozhenii [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primenenie = Neurocomputers. Development and application*, 2014, no. 6, pp. 35-39. (In Russ.)
- 15. Shatalova O. V. Assotsiatsii reshayushchikh modulei v intellektual'nykh sistemakh prognozirovaniya serdechno-sosudistykh zabolevanii [Association of critical modules in intelligent systems for the prognosis of cardiovascular diseases]. Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System analysis and management in biomedical systems, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 153-162. (In Russ.)
- 16. Kiselev A. V., Shatalova O. V., Kovalev E. V., eds. Slabye klassifikatory s virtual'nymi potokami v intellektual'nykh si-stemakh prognozirovaniya serdechno-sosudistykh oslozhnenii [Weak classifiers with virtual streams in intelligent systems predict cardiovascu-

lar complications]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. *Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, no. 1 (30), vol. 9, p. 6-19. (In Russ.)

17. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Z. D. Universal'nye setevye modeli dlya za-dach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Generic network model for classification problems in biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4(43), pt. 2, pp. 44-50. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the Authors

Ефремов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: Efremov ma@mail.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация e-mail: SFilist@gmail.com

Забанов Дмитрий Сергеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: d.zabanov@yandex.ru

Мяснянкин Максим Борисович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: 79606039503@mail.ru

Савинов Денис Юрьевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация

e-mail: SFilist@gmail.com

**Mihail A. Efremov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University Kursk, Russian Federation

e-mail: Efremov\_ma@mail.ru

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University Kursk, Russian Federation e-mail: SFilist@gmail.com)

**Dmitry S. Zabanov**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: d.zabanov@yandex.ru

Maksim B. Myasnyankin, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: 79606039503@mail.ru

**Denis Yu. Savinov**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: SFilist@gmail.com

#### Оригинальная статья / Original article

УДК 004.932

# Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья

H. А. Кореневский<sup>1</sup> ⊠, А. В. Титова<sup>1</sup>

⊠ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

#### Резюме

**Цель исследования** – разработка метода синтеза нечетких математических моделей диагностики и прогнозирования болезней, провоцируемых действием на организм человека электромагнитных полей радиочастотного диапазона, позволяющего получать решающие правила, обеспечивающие приемлемое качество принятия решений.

**Методы**. В данном исследовании выбран метод мягких вычислений с использованием гибридных нечетких правил, зарекомендовавший себя как метод с подобными данными, который позволяет использовать мультипликативный эффект воздействия магнитных полей радиочастотного диапазона на организм человека с учетом различных факторов риска, таких как образ жизни, экология и другие.

Результаты. Представленный метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики был апробирован на синтезе математической модели прогнозирования появления и развития заболеваний нервной системы у людей, которые используют долгое время персональные компьютеры, а также мобильную связь. В ходе математического моделирования показано, что полученная прогностическая модель обеспечивает уверенность в правильном прогнозе нервных болезней с результатом не ниже 0,85.

Заключение. В работе получены нечёткие математические модели прогнозирования появления и развития нервных болезней у людей с учетом влияния электромагнитного поля радиочастотного диапазона, а также индивидуальных факторов риска. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу и развитию заболеваний нервной системы составляет более 85%, а результаты статистических испытаний показали, что диагностические чувствительность и специфичность превышают 97%, что позволяет рекомендовать полученные результаты в медицинскую практику.

**Ключевые слова**: метод; математическая модель; нечеткая логика; прогнозирование; диагностика; электромагнитное поле; радиочастотный диапазон.

**Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>©</sup> Кореневский Н. А., Титова А. В., 2020

Для цитирования: Кореневский Н. А., Титова А. В. Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 102-117.

Поступила в редакцию 27.03.2020

Подписана в печать 23.04.2020

Опубликована 25.05.2020

# Fuzzy Models for Assessing the Impact of Radio Frequency **Electromagnetic Fields on Health**

## Nicolay A. Korenevsky<sup>1</sup> ⊠, Anna V. Titova<sup>1</sup>

#### Abstract

The purpose of the research is to develop a method for synthesizing fuzzy mathematical models for diagnosing and predicting diseases provoked by the action of electromagnetic fields in the radio frequency range on the human body, which allows us to obtain decisive rules that ensure an acceptable quality of decision-making.

Methods. In this study, we selected a soft computing method using hybrid fuzzy rules that has proven itself in working with such data, which allows us to use the multiplicative effect of radio frequency magnetic fields on the human body, taking into account various risk factors, such as lifestyle, ecology, and others.

Results. The presented method of synthesis of mathematical models for forecasting and diagnostics was tested on the synthesis of a mathematical model for predicting the appearance and development of diseases of the nervous system in people who use personal computers and mobile communications for a long time. In the course of mathematical modeling, it is shown that the obtained prognostic model provides confidence in the correct prognosis of nervous diseases with a result not lower than 0.85.

Conclusion. The paper provides fuzzy mathematical models for predicting the appearance and development of nervous diseases in people, taking into account the influence of the electromagnetic field of the radio frequency range, as well as individual risk factors. In the course of expert evaluation and mathematical modeling, it was shown that confidence in the correct decision-making on the prognosis and development of diseases of the nervous system is more than 85%, and the results of statistical tests showed that diagnostic sensitivity and specificity exceed 97%, which allows us to recommend the results in medical practice.

Keywords: method; mathematical model; fuzzy logic; forecasting; diagnostics; electromagnetic field; radio frequency range.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Korenevsky N. A., Titova A. V. Fuzzy Models for Assessing the Impact of Radio Frequency Electromagnetic Fields on Health. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020; 10(2): 102-117. (In Russ.)

Received 27.03.2020 Accepted 23.04.2020 Published 25.05.2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

#### Введение

Современные исследования российских и мировых ученых показывают, что длительное воздействие электромагнитных полей (ЭМП) радиочастотного диапазона искусственного происхождения оказывают негативные воздействия на организм человека. При этом если действия ЭМП значительной интенсивности достаточно хорошо изучены и регламентируются соответствующими санитарными нормами и правилами и ГОСТами [1; 2; 3], то вредные воздействия ЭМП малой интенсивности подтверждаются многими исследователями, но при этом практически отсутствуют количественные оценки их влияния на состояние здоровья человека в сочетании с другими экзогенными и эндогенными факторами.

В реальных условиях организм человека часто подвергается комбинированному, сочетанному и смешанному воздействию ЭМП различных частотных диапазонов различной интенсивности, вызывающих мультипликативный эффект, приводя к повышению риска возникновения и развития целого ряда социально значимых заболеваний, особенно при их длительном воздействии [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11].

Анализ литературы, посвященный оценке влияния ЭМП на организм человека, показал, что они в основном ориентированы на статистический анализ заболеваемости. Методам синтеза моделей прогнозирования и дифференци-

альной диагностики заболеваний, провоцируемых действием ЭМП различной дальности, в отечественных и зарубежных исследованиях уделяется недостаточно внимания.

Синтез надежно работающих моделей принятия решений о состоянии людей, подвергающихся воздействию промышленных ЭМП радиочастотного диапазона, осложняется тем, что кроме исследуемых факторов риска на них действуют многочисленные дополнительные факторы, часто имеющие неполное и нечеткое представление с пересекающейся «плохо» определяемой структурой классов.

В этих условиях с учетом рекомендаций работ кафедры биомедицинской инженерии (БМИ) Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) для получения «надежно работающих» прогностических и диагностических решающих правил целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), подробно представленную в работах [12; 13; 14].

#### Материалы и методы

Радиочастотный диапазон занимает большую полосу частот от 3 кГц до 300 ГГц, которые, имея различные механизмы взаимодействия с тканями человеческого тела, порождают многообразные отклики организма, приводя к различным патологическим процессам.

Различным образом влияют и ЭМП различной интенсивности, порождая

тепловые и специфические процессы в организме человека. Значимо меняется характер воздействия от сочетанных и комбинированных ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими факторами риска.

Проведенный анализ показал, что в таких условиях использование МСГНРП для синтеза соответствующих прогностических и диагностических решающих правил требует творческого подхода, учитывающего специфику решаемых задач, конкретизируя способы и последовательность выбора частных моделей и их агрегации в финальные модели принятия решений.

С учетом специфики воздействия ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими факторами риска предлагается метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики заболеваний, провоцируемых воздействием ЭМП радиочастотного диапазона, состоящий из следующих основных этапов:

1. Формирование экспертной группы, компетентной в области взаимодействия ЭМП с биообъектами и имеющей большой опыт синтеза гибридных нечетких решающихся правил для решения задач прогнозирования и медицинской диагностики. В случае необходимости происходит обучение экспертов к работе и использованию нечетких решающих правил. Качество и количество экспертов выбирается исходя из поставленной задачи.

2. Определение диапазонов частот  $f_i$ , значений их энергетической экспозиции ЭЭ, и индивидуального (для каждого человека) времени воздействия  $t_i$ , i-го диапазона частот в течение всего времени контакта обследуемого с исследуемыми ЭМП.

При выборе диапазонов частот рекомендуется пользоваться принятой у российских специалистов градацией (3-30 κΓμ (VLF), 30-300 κΓμ (LF), 300-3000 кГц (МF), 3-30мГц (НF), 30-300 мГц (VHF), 300-3000 мГц (UHF), 3-30 ГГц (SHF), 30-300 (ГГц)). Анализ литературных данных показывает, что в рамках этих диапазонов наблюдаются схожие биологические эффекты взаимодействия ЭМП с биоструктурами.

Формулируя этапы и элементы синтеза решающих правил, экспертам следует учитывать, что степень влияния ЭМП на организм человека существенно зависит от его индивидуальных особенностей: психофизиологического индивидуального портрета; наличия хронических заболеваний; возраста; адаптационного резерва; функционального состояния и т. д. Хорошо известен эффект адаптации организма к вредному воздействию ЭМП. При синтезе нечетких решающих правил (НРП) необходимо учитывать наличие резонансных эффектов, особенно для смешанных и сочетанных ЭМП [9; 11].

Кроме ЭМП факторами риска, которые необходимо учитывать при синтезе прогностических И диагностических НРП, являются индивидуальные факторы риска (употребление алкоголя, лекарств, наследственность и др.), экологические факторы (геомагнитные поля, работа и проживание в условиях действия вредных производств и др.), эргономические факторы (рабочая поза, микроклимат, первичный уровень психоэмоционального напряжения и утомления и др.).

По выбранным факторам рисков формируется алфавит пространства информативных признаков и алфавит исследуемых классов состояний. При формировании анализируемых классов состояний рекомендуется учитывать, что, по данным отечественных и зарубежных ученых, для диапазона частот, излучаемых персональными компьютерами, характерно развитие нейроциркулярной листонии И сердечнососудистых заболеваний. Длительное воздействие ЭМП мобильных телефонов приводит к появлению головных болей, снижению внимания и памяти, нарушению сна, усталости, раздражительности и др. В зоне действия теле- и радиовышек регистрируются повышенный риск появления опухолей головного мозга и рака крови; гормональные нарушения; заболевания центральной нервной и сердечно-сосудистой системы; ослабление иммунитета. У операторов радиолокационных станций наблюдаются брадикардия, гипотония, неврастения, повышение утомляемости, ухудшение концентрация внимания, общая слабость, головные боли, сонливость, импотенция [4; 5; 6; 7].

С учетом того, что для достаточно мощных ЭМП радиочастного диапазона определены предельно допустимые уровни с известными последствиями, а для низкоинтенсивных ЭМП указаны лишь тенденции возможных заболеваний в основном на качественном уровне, предлагаются две различные ветви синтеза соответствующих решающих правил.

В основу синтеза решающих правил для ЭМП с 0,5 ПДУ и выше целесообразно выбрать механизм синтеза нечетких решающих правил, предложенный в работах [8; 9; 10; 11] для ЭМП промышленной частоты (50 Гц).

Для малоинтенсивных ЭМП предлагается использовать систему параметров с доказанной чувствительностью по отношению к реакции организма на длительное пребывания человека в зоне действия электромагнитных полей радиочастотного диапазона.

Для ЭМП частотного диапазона (30 кГц – 300 мГц), энергетическая экспозиция электрического (ЭЭ<sub>Е</sub>) и магнитного (ЭЭ<sub>Н</sub>) полей которых превышает 0,5 ПДУ, базовым элементом решающих правил является функция принадлежности к исследуемым классам  $\omega_{\ell}$  состояний  $\mu_{\ell i}(z_{\ell i})$  с базовой переменной  $z_{\ell i}$  для частотного диапазона i, определяемой с учетом энергетической экспозиции электрической и магнитной составляющих и общего времени воздействия ЭМП i-го диапазона на организм человека.

В соответствии с рекомендациями [8; 9; 10; 11], при условии, что исследуемые частотные диапазоны действуют на обследуемого одно и то же время  $t_6$ , базовую переменную для класса заболеваний  $\omega_{\ell}$  предлагается определять по формуле

$$Z_{\ell} = f_{\ell}(Q) \cdot f_{\ell}^{*}(t_{\mathfrak{g}}), \tag{1}$$

где Q – показатели энергетической экспозиции для воздействующих ЭМП;  $f_{\ell}(Q)$  – нормировочная функция степени влияния ЭМП исследуемых диапазонов на появление и развитие заболеваний  $\omega_\ell$  с областью определения  $[0,...,1]; f_{\ell}^{*}(t)$  – нормировочная функция степени влияния времени нахождения обследуемого под воздействием исследуемого диапазона частот ЭМП.

В соответствии с рекомендациями СНиП и ГОСТ [2; 3], если на обследуемого действует ЭМП одного частотного диапазона  $f_i$ , то

$$Q = \frac{\Im \Im_{Ei}}{\Im \Im_{Ei\Pi \Pi JV}} + \frac{\Im \Im_{Hi}}{\Im \Im_{Hi\Pi \Pi JV}},\tag{2}$$

где  $\Im \Im_{Ei} = E_i^2 \cdot T$ – энергетическая экспозиция электрического поля для диапазона частот  $f_i$ ;  $E_i$  – напряженность электрической составляющей ЭМП; Твремя воздействия за смену в часах;  $ЭЭ_{Hi} = H_i^2 \cdot T$  – энергетическая экспозиция магнитного поля для і-го диапазона частот;  $H_i$  – напряженность магнитной составляющей ЭМП; ЭЭ $_{Ei\Pi\Pi Y}$ ,  $39_{HiIIIIV}$  – соответствующие предельно допустимые уровни.

В случае когда происходит облучение от нескольких источников, работающих в разных частотных диапазонах, устанавливаются различные ПДУ:

$$Q = \sum_{i} \left( \frac{\Im \vartheta_{Ei}}{\Im \vartheta_{Ei\Pi\Pi V}} + \frac{\Im \vartheta_{Hi}}{\Im \vartheta_{Hi\Pi\Pi V}} \right). \tag{3}$$

1. Для ЭМП частотного диапазона от 30 мГц до 300 ГГц электрическая экспозиция для выражений (2) и (3) определяется по значениям плотности потока энергии ППЭ. При этом  $ЭЭ_E$  заменяется на  $ЭЭ_{\Pi\Pi \ni} = \Pi\Pi \ni T$  со «своими» ПДУ (ЭЭ $_{\Pi\Pi \ni \Pi \Pi Y}$ ).

Если несколько источников различных диапазонов «облучают» обследуемого с различной продолжительностью  $t_i$ , то определяются различные базовые переменные  $z_{\ell i}$  с построением «своих» функций принадлежности  $\mu_{\ell i}(z_{\ell i})$ , агрегирующиеся в решающие правила типа:

$$UEP_{\ell} = F_{\ell Aq}[\mu_{\ell i}(z_{\ell i})], \tag{4}$$

где  $F_{\ell Aq}$  – функция агрегации по анализируемым диапазонам частот;  $UEP_{\ell}$  – уверенность в появлении и развитии заболеваний  $\omega_\ell$  по электромагнитной составляющей.

Учитывая возможные резонансные и нелинейные эффекты действия на организм человека различных частотных диапазонов ЭМП, целесообразно функцию агрегации определять по обучающей выборке с использованием нечеткой модификации метода группового учета аргументов [9; 11; 14].

При отсутствии обучающей выборки достаточного объема в качестве агрегатора целесообразно проверить применимость итерационной формулы Е. Шортлифа, определяя параметры функций принадлежности в соответствии с рекомендациями [14]:

$$UEP_{\ell}(p+1) = UEP_{\ell}(p) +$$
  
  $+ \mu_{\ell(i+1)} z_{\ell(i+1)} [1 - UEP_{\ell}(p)],$  (5)

где p — номер итерации;  $UEP_{\ell}(1) = \mu_{\ell 1}(z_{\ell 1}).$ 

- 2. Определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма и в соответствии с [11; 12; 13; 14], используются нечеткие модели принятия решений по классам состояний  $\omega_{\ell}$  с расчетом прогностической и (или) диагностической уверенности  $UD_{\ell}$ .
- 3. Полученные частные решающие правила агрегируются в финальные математические модели:

$$UF_{\ell} = FF_{\ell}(UEP_{\ell}, UD_{\ell}), \tag{6}$$

где  $FF_\ell$  — финальные функции агрегации.

В алфавите признаков математических моделей  $UD_{\ell}$  целесообразно использовать показатели функционального состояния, функционального резерва, адаптационного потенциала и защитных функций организма от действия различных вредных факторов, включая ЭМП [14].

4. Для низкоинтенсивных ЭМП связь между параметрами электромаг-

нитного поля и возникающими от его действия заболеваниями носит более неопределенный и неустойчивый характер, что определяется ослаблением взаимодействия с биологическими структурами, работой адаптационных механизмов организма, неравномерной интенсивностью воздействия, часто чередующейся паузами, например, при использовании мобильной связи и т. д.

В этих условиях при постоянно действующих полях достаточно стабильной интенсивности синтезируется модель типа (5) в варианте выбора вида и параметров функций принадлежности высококвалифицированными экспертами в отсутствие репрезентативных обучающих выборок. При этом низкое качество принятия решений при достаточно низких значениях функций принадлежности для ЭМП компенсируется увеличением числа дополнительных информативных признаков, характеризующих индивидуальные характеристики организма с включением показателя, характеризующего защитные функции организма, определяемые, например, в соответствии с рекомендациями работ [14; 15].

В этих работах приводится математическая модель количественной оценки уровня защиты UZ:

$$UZ = F_{UZ}(U\Phi U, UZOB), \tag{7}$$

где ИФИ – индекс функциональных изменений по Р. Баевскому; *UZOB* – уровень защиты, определяемый по энергетическим характеристикам биологически активных точек.

C учетом показателя UZ функция принадлежности в выражении (5) заменяется на переменную:

$$UEZ_{li+1} = \begin{cases} \mu_{\ell(i+1)}(z_{\ell(i+1)}) - UZ_{\ell i}, ecnu \ \mu_{\ell(i+1)}(z_{\ell(i+1)}) > UZ_{\ell i}; \\ 0, ecnu \ \mu_{\ell(i+1)}(z_{\ell(i+1)}) \leq UZ_{\ell i}. \end{cases}$$

Для нестабильных во времени и (или) пространстве ЭМП радиочастотного диапазона с плохо определяемыми классами состояний предлагается использовать нечеткие табличные модели, аналогичные моделям, описанным в [14].

По столбцам моделей выписываются характеристики источника излучения, например классы мобильных телефонов, типы персональных компьютеров, типы роутеров и т. д.

По столбцам определяется время воздействия. Элементами таблицы являются показатели уверенности  $UF_{\ell ij}$ появления и развития заболевания  $\omega_{\ell}$ для источника ЭМП с номером і для временного интервала j.

Для нескольких источников с различными временными экспозициями уверенность определяется агрегацией  $UE_{\ell i,i}$ :

$$UEP_{\ell} = F_{IIE}(UE_{\ell ij}). \tag{8}$$

Показатели  $UEP_{\ell}$  выражения (8) агрегируются с другими факторами риска аналогично п.п. 4-5 и рекомендациями [14].

5. В условиях надежно определяемых репрезентативных выборок для оперативного слежения за состоянием здоровья людей, находящихся в зоне действия ЭМП, рекомендуется использовать ряд чувствительных к действию ЭМП радиочастотного диапазона индикаторов. К таким индикаторам относятся состояние внимания, памяти, мышления, а также динамика изменения энергетического состояния БАТ, связанных с патологией  $\omega_{\ell}$ , и общесистемных БАТ. Методики исследования этих показателей и соответствующее аппаратное обеспечение достаточно подробно описаны в работах [15; 16; 17; 18; 19].

Этот дополнительный набор показателей может быть использован в моделях принятия решений (6) для повышения качества принимаемых решений и для контроля текущего состояния обследуемых с целью принятия решений о возможной коррекции ряда функций организма человека.

# Результаты и их обсуждение

Используя описанный выше метод, была решена задача получения математических моделей прогнозирования появления и развития заболеваний нервной системы у людей, чья работа связана с длительным использованием персональных компьютеров в сочетании с мобильными телефонами.

С учетом высокой неопределенности и нестационарности режима работы операторов с мобильными телефонами (МТ) и персональными компьютерами (ПК) была выбрана нечеткая табличная модель, фрагмент которой представлен ниже (табл.).

**Таблица**. Оценка уверенности в появлении и развитии нервных болезней от использования МТ и ПК

**Table**. Assessment of confidence in the occurrence and development of nervous diseases from the use of MT and PC

Источник ЭМП с харак-	Время (год)										
тером подключения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10
МТ до 10 подключений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
МТ от 10 до 20 подклю-	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15	0,2
чений											
МТ от 20 до 40 подклю-	0	0	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
чений											
МТ свыше 40 подключе-	0	0,05	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3
ний											
ПК с продолжительно-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,15
стью до 1 часа											
ПК с продолжительно-	0	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
стью от 1 до 3 часов											
ПК с продолжительно-	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
стью от 3 до 5 часов											
ПК с подключением от 5	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
до 7 часов											
ПК с подключением от	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
7 до 9 часов											
ПК с подключением	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
свыше 9 часов											

В таблице приведены варианты подключения на связь МТ в сутки и продолжительность работы с ПК, подключенного к беспроводной сети Интернет в сутки.

С учетом рекомендаций [8; 9; 11; 14] агрегация составляющих таблицы осуществляется с использованием частной модели вида

$$UEP_{H} = UE_{H}(MT) + UE_{H}(\Pi K) -$$

$$-UE_{H}(MT) \cdot UE_{H}(\Pi K), \qquad (9)$$

где  $UE_H(MT)$ ,  $UE_H(\Pi K)$  — уверенность человека с МТ и ПК соответственно.

Результаты показали, что для наиболее часто встречающихся условий труда UEP<sub>H</sub> определяется на уровне 0,42.

Для повышения надежности в принимаемых решениях в соответствии с рекомендациями [14; 15] было принято дополнительно использовать решение характеристик биологически активных точек (БАТ) и индивидуальные факторы риска.

Синтез частотных решающих правил, использующих энергетические характеристики БАТ, осуществляется в соответствии с рекомендациями работ [14; 15]. С учетом этих рекомендаций по заболеваниям нервной системы следует использовать точки Р9, С5, V43, V60, R9 и MC7, в том числе пары диагностически значимых точек (ДЗТ) {V60, R9} и {R7, MC7}.

В соответствии с рекомендациями частную математическую модель для определения уверенности  $UDB_H$  в появлении и развитии заболеваний нервной системы можно представить следующим образом:

ЕСЛИ [
$$(\delta R_{P9} \text{ И } \delta R_{V60})$$
 ИЛИ ( $\delta R_{R7} \text{ И } \delta R_{MC7}$ ) $\geq 20\%$ ], ТО   
{ $UDB_H(j+1) = UDB_H(j) + \mu_H(\delta R_{j+1})[1 - UDB_H(j)]$ }. (10)  
ИНАЧЕ ( $UDB_H = 0$ ).

В [19; 20] основными факторами риска был определен следующий состав: прием алкоголя (AL); психоэмоциональные нагрузки, определяемые субъективным ощущением опрашиваемого (PS); болезни нервной системы у близких родственников (Br); прием лекарственных средств, оказывающих вредное воздействие на нервную систему (LsB).

Также в [19; 20] показаны выражения для определения частных функций, принадлежащих к классу  $\omega_H$ .

$$\mu_{\Pi H}(Ls) = 
\begin{cases}
0,01Ls, & \text{если} \quad Ls < 25; \\
0,25, & \text{если} \quad Ls \ge 25,
\end{cases}$$

$$\mu_{\it П.H.}(\it AL) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad \it AL < 2; \\ 0,01\it AL - 0,02, & \text{если} \quad \it 2 \le \it AL < 26; \\ 0,22, & \text{если} \quad \it AL \ge \it 26, \end{cases}$$

$$\mu_{\it ПH}(PS) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad PS < 0,15; \\ 1,28PS - 0,19, & \text{если} \quad 0,15 \leq PS < 0,5; \\ 0,45, & \text{если} \quad PS \geq 0,5, \end{cases}$$

$$\mu_{IIH}(Br) = 
\begin{cases}
0.05Br, & \text{если} & Br < 3; \\
0.15, & \text{если} & Br = 3.
\end{cases}$$

Группа экспертов выбрала также дополнительные факторы риска: гормональные нарушения  $(b_1)$ ; эндокринные заболевания  $(b_2)$ ; злоупотребление кофе  $(b_3)$ ; хронические заболевания внутренних органов ( $b_4$ ); аллергические заболевания  $(b_5)$ ; шейный остеохондроз  $(b_6)$ ; тяжелое течение инфекционных заболеваний  $(b_7)$ ; интоксикации  $(b_8)$ ; травмы  $(b_9)$ . Данные факторы предложено было кодировать с использованием двоичного кода ( $b_i = 1 - \text{есть фактор}, b_i = 0 - \text{нет}$ фактора), в случае совокупного наличия перечисленных выше факторов риска В необходимо использовать простую сумму  $b_i$ , т. е.

$$B = \sum_{i} b_{i}$$
.

Согласно [19; 20], уверенность в появлении и развитии заболеваний оценивается функцией принадлежности  $\mu_{\Pi H}(B) = 0.033B \, .$ 

Для правильной оценки уверенности в появлении и развитии заболеваний нервной системы по данной группе признаков целесообразно использовать выражение

$$UOG_{H}(q+1)=UOG_{H}(q)+$$
  
  $+\mu_{\Pi H}(Q_{q+1})[1-UOG_{H}(q)],$  (11)

где  $UOG_H(1) = \mu_{\Pi H}(LS)$ ;  $Q_2 = AL$ ;  $Q_3 = PS$ ;  $Q_4 = Br$ ;  $Q_5 = B$ .

В соответствии с [14; 19; 20], уверенность в появлении и развитии заболеваний нервной системы по полученным трем составляющим уверенности UPH в  $\omega_H$  можно определить выражением

$$UPH(q + 1) = UPH(q) =$$

$$= Q_{q+1}[1 - UPH(\omega)], \qquad (12)$$

где  $UPH(1) = Q_1 = UEP_H$ ;  $Q_2 = UDB_H$ ;  $Q_3 = UOG_H$ .

В результате математического моделирования и экспертного оценивания было доказано, что уверенность в правильном прогнозировании по классу  $\omega_H$  превышает 85%.

В ходе статистических контрольных показаний на репрезентативных контрольных выборках для двух клас-

сов в течение 5 лет наблюдения не приобрели заболеваний нервной системы;  $\omega_H$  — в течение 5 лет использования получили заболевания нервной системы, было установлено, что диагностические специфичность и чувствительность превышает 87%, что является хорошим результатом.

# Выводы

В работе описан метод синтеза математических моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья человека и получены нечеткие математические модели прогнозирования и развития заболеваний нервной системы у людей, подвергающихся воздействию электромагнитных полей различной модальности в сочетании с другими эндогенными и эндогенными факторами риска. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу развития заболеваний нервной системы превышает 85%, при в наличии ранних стадий – 92%, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику работы профильных врачей.

# Список литературы

- 1. Гигиенические нормативы. Физические факторы окружающей и производственной сферы: справочник / О. П. Ломов, И. М. Ахметзянов, С. В. Гребеньков, С. П. Левашов, Л. П. Терентьев. М.: Профессионал, 2011. 794 с.
- 2. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. URL: http://www.docs.cntd.ru>document/901853847 (дата обращения: 15.02.2020).

- 3. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые условия на рабочих местах и требования к проведению контроля. URL: http://www.docs.cntd.ru>document/5200272 (дата обращения: 20.03.2020).
- 4. Проблема изучения влияния электромагнитных полей на здоровье человека. Итоги и перспективы / Ю. П. Пальцев, Л. В. Походзей, Н. Б. Рубцова, С. Ю. Перов, Е. В. Богачева // Медицина труда и промышленная экология. 2013. № 6. С. 35-40.
- 5. Григорьев Ю. Г., Григорьев О. А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2013. 565 с.
- 6. Вихарев А. П. Влияние сотовой связи на здоровье пользователя // Наука производство – технологии – экология: сборник материалов конференции. Киров, 2004. T. 4. C. 181-182.
- 7. Электромагнитная обстановка на рабочих местах с ПЭВМ / В. Г. Никитина, Г. Г. Ляшко, Э. Ю. Нечепоренко [и др.] // Проблемы безопасности персонала: ежегодник Рос. нац. к-та по защите от неионизирующих излучений за 2011 год: сб. тр. М.: Центр электромагнитной безопасности, 2012. С. 131-137.
- 8. Математические модели оценки влияния электромагнитных полей на появление и развитие профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли / М. А. Мясоедова, Н. А. Кореневский, Л. В. Стародубцева, М. В. Писарев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 2. С. 27-42.
- 9. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики / Н. А. Кореневский, М. А. Мясоедова, К. В. Разумова, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 127-143.
- 10. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у работников электроэнергетических предприятий / М. А. Мясоедова, Л. В. Стародубцева, А. В. Титова, П. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3. С. 160-172.
- 11. Мясоедова М. А. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний работников электроэнергетической отрасли на основе гибридных нечетких моделей: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2019. 162 с.
- 12. Кореневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12-20.

- 13. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33-35.
- 14. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
- 15. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.
- 16. Конева Л. В., Кореневский Н. А., Дегтярев С. В. Оценка уровня психоэмоционального напряжения и утомления по показателям, характеризующим состояние внимания человека // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 4. С. 993-1000.
- 17. Метод оценки функционального резерва человека оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода / Н. А. Кореневский, А. Н. Коростелев, Л. В. Стародубцева, В. В. Серебровский // Биотехносфера. 2012. № 1. С. 44-49.
- 18. Гибридные нечеткие модели оценки функционального состояния и состояния здоровья человека-оператора информационно-насыщенных систем / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, И. И. Хрипина, М. А. Мясоедова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 105-109.
- 19. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, Н. А. Серебровский, В. И. Коптева, Н. А. Говорухина. Курск: Издво Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 231 с.
- 20. Использование технологий мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса: монография / Р. В. Степашов, Н. А. Кореневский, А. В. Серебровский, Т. Н. Говорухина. Курск: Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2016. 224 с

# Reference

- 1. Lomov O. P., Ahmetzyanov I. M., Grebenkov S. V., Levashov S. P., Terentiev L. P. Gigienicheskie normativy. Fizicheskie faktory okruzhayushchei i proizvod-stvennoi sfery [Health standards. Physical factors of the environment and production sphere]. Moscow, Professional Publ., 2011. 794 p. (In Russ.)
- 2. SanPiN 2.2.4.1191-03. Elektromagnitnye polya v proizvodstvennykh usloviyakh [SanPiN 2.2.4.1191-03. Electromagnetic fields in production conditions]. (In Russ.) Available at: http://www.docs.cntd.ru>document/901853847. (accessed 15.02.2020)

- 3. GOST 12.1.006-84. Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Elektromagnitnye polya radiochastot. Dopustimye usloviya na rabochikh mestakh i trebovaniya k provedeniyu kontrolya [State Standard 12.1.006-84. The system of occupational safety standards. Electromagnetic fields of radio frequencies. Acceptable workplace conditions and monitoring requirements]. (In Russ.) Available at: http://www.docs.cntd.ru>document/ 5200272. (accessed 20.03.2020)
- 4. Paltsev Y. P., Pohozdey L. V., Rubtsova N. B., Perov S. U., Bogacheva E. V. Problema izucheniya vliyaniya elektromagnitnykh polei na zdorov'e cheloveka. Itogi i perspektivy [The problem of studying the influence of electromagnetic fields on human health. Results and prospects]. Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational medicine and industrial ecology, 2013, no. 6, pp. 35-40. (In Russ.)
- 5. Grigoriev U. G., Grigoriev O. A. Sotovaya svyaz' i zdorov'e: elektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy, prognoz opasnosti [Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard forecast]. Moscow, Economika Publ., 2013. 565 p. (In Russ.)
- 6. Vikharev A. P. [Influence of cellular communication on the user's health]. Nauka proizvodstvo – tekhnologii – ekologiya. Sbornik materialov konferentsii [Science – production – technologies – ecology. Collection of conference materials]. Kirov, 2004, vol. 4, pp. 181-182. (In Russ.)
- 7. Nikitina V. G., Lyashko G. G., Necheporenko E. Yu., eds. [Electromagnetic environment at work places with PC]. Problemy bezopasnosti personala. Ezhegodnik Ros. nats. k-ta po zashchite ot neioniziruyushchikh izluchenii za 2011 god. Sb. tr. [Security concerns of the staff. Yearbook of the Russian national Committee for protection from non-ionizing radiation for 2011. Sat. trudov]. Moscow, Center for electromagnetic safety Publ., 2012, pp. 131-137. (In Russ.)
- 8. Myasoedova M. A., Korenevsky N. A., Starodubtseva L. V., Pisarev M. V. Matematicheskie modeli otsenki vliyaniya elektromagnitnykh polei na poyavlenie i razvitie professional'nykh zabolevanii v elektroenergeticheskoi otrasli [Mathematical models for evaluating the influence of electromagnetic fields on the appearance and development of occupational diseases in the electric power industry]. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technologies, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 27-42. (In Russ.)
- 9. Korenevsky N. A., Myasoedova M. A., Razumova K. V., Serebrovsky A. V. Metod sinteza matematicheskikh modelei prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanii rabotnikov predpriyatii elektroenergetiki [Method of synthesis of mathematical models of forecasting and diagnostics of professional diseases of employees of electric power industry enterprises]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya:

*Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University,* 2019, vol. 9, no. 2, pp. 127-143. (In Russ.)

- 10. Myasoedova M. A., Starodubtseva L. V., Titova A. V., Shulga P. V. Matematicheskie modeli prognozirovaniya i rannei diagnostiki zabolevanii nervnoi sistemy u rabotnikov elektroenergeticheskikh predpriyatii [Mathematical models of forecasting and early diagnostics of diseases of the nervous system in employees of electric power enterprises]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University,* 2019, vol. 9, no. 3, pp. 160-172. (In Russ.)
- 11. Myasoedova M. A. Prognozirovanie i rannyaya diagnostika professional'nykh zabolevanii rabotnikov elektroenergeticheskoi otrasli na osnove gibridnykh nechetkikh modelei. Diss. cand. tekhn. nauk [Forecasting and early diagnostics of occupational diseases of electric power industry workers based on hybrid fuzzy models. Cand. tech. sci. diss.]. Kursk, 2019, 162 p. (In Russ.)
- 12. Korenevsky N. A. Proektirovanie nechetkikh reshayushchikh setei, nastraivaemykh po strukture dannykh dlya zadach meditsinskoi diagnostiki [Design of fuzzy decision networks configured by data structure for medical diagnostics tasks]. Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System analysis and management in biomedical systems, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12-20. (In Russ.)
- 13. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [Use of fuzzy logic of decision making for medical expert systems]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*, 2015, no. 1, pp. 33-35. (In Russ.)
- 14. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p. (In Russ.)
- 15. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A., Al-Kasasbeh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei [Theoretical foundations of acupuncture Biophysics with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p. (In Russ.)
- 16. Konev L. V., Korenev N. A., Degtyarev S. V. Otsenka urovnya psikhoemotsional'nogo napryazheniya i utomleniya po pokazatelyam, kharakterizuyushchim sostoyanie vnimaniya cheloveka [Assessment of the level of psychoemotional tension and fatigue on the parameters describing the state of the human attention]. Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System analysis and management in biomedical systems, 2012, vol. 11, no. 4, pp. 993-1000. (In Russ.)
- 17. Korenevsky N. A., Korostelev A. N., Starodubtseva L. V., Serebrovsky V. V. Metod otsenki funktsional'nogo rezerva cheloveka operatora na osnove kombinirovannykh pravil

nechetkogo vyvoda [Method of assessing the functional reserve of the human operator on the basis of the combination rules of fuzzy inference]. Biotekhnosfera = Biotechnosphere, 2012, no. 1, pp. 44-49. (In Russ.)

- 18. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I., Myasoedova M. A. Gibridnye nechetkie modeli otsenki funktsional'nogo sostoyaniya i sostoyaniya zdorov'ya chelovekaoperatora informatsionno-nasyshchennykh sistem [Hybrid fuzzy models for evaluating the functional state and health of a human operator of information-rich systems]. Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System analysis and management in biomedical systems, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 105-109. (In Russ.)
- 19. Korenevsky N. A., Serebrovsky N. A., Kopteva V. I., Govorukhina N. A. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanii, vyzyvaemykh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennykh modelei [Forecasting and diagnostics of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Publishing House of Kursk State Agricultural Academy, 2012. 231 p. (In Russ.)
- 20. Korenevsky N. A., Korenevsky N. A., Serebrovsky A. V., Govorukhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkikh vychislenii dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanii rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [Using soft computing technologies for predicting and diagnosing occupational diseases of agricultural workers]. Kursk, Publishing House of Kursk State Agricultural Academy, 2016. 224 p. (In Russ.)

# Информация об авторах / Information about the Authors

Кореневский Николай Алексеевич, док- Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Enтор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

e-mail: kstu-bmi@yandex.ru.

gineering), Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: kstu-bmi@yandex.ru.

Титова Анна Владимировна, аспирант, Anna V. Titova, Post-Graduate Student, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

e-mail: nyatarrr@yandex.ru

Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: nyatarrr@yandex.ru

# МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

# MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

УДК 535.015

# Моделирование процесса агрегации эритроцитов методом Монте-Карло для диагностики оптоакустическим методом

Д. А. Кравчук<sup>1</sup> ⊠

#### Резюме

**Цель исследований** — разработка математической модели агрегированных эритроцитов для получения количественных параметров состояния элементов крови с помощью оптоакустического эффекта. Последние годы все больше исследований проводится в области импульсной оптоакустической диагностики крови in vivo и in vitro. Оптоакустические методы сочетают в себе высокий оптический контраст оптической томографии с высоким разрешением ультразвуковых методов.

**Методы**: моделирование эритроцитов с помощью метода Монте-Карло в среде Matlab 2020b; разработка алгоритма агрегации эритроцитов в кластеры. Использована модель поглощения, включающая поглощающую ячейку, в которой мы можем измерить профиль давления акустического сигнала. Результирующее давление акустического сигнала может быть использовано для моделирования сигнала от одной клетки через монослой, состоящий из разного количества клеток.

**Результаты.** Получены модельные изображения моделируемых срезов ткани размером 200×200мкм агрегированных и неагрегированных эритроцитов. Проведен расчет уровня спектральной плотности мощности акустического сигнала, полученного в результате оптоакустического эффекта для различных процентов агрегации эритроцитов. Полученные результаты с помощью оптоакустического метода позволяют сделать вывод о возможности идентификации агрегации эритроцитов in vitro и in vivo.

Заключение. Установлено, что амплитуда спектральной плотности мощности увеличивалась с ростом процента агрегации. Показана возможность определения уровня агрегации эритроцитов в крови оптоакустическим методом. Результаты этого исследования могут помочь нам понять проблемы, стоящие перед использованием оптоакустического метода. Необходимо разработать новые стратегии для разработки и производства датчиков и алгоритмов для идентификации и анализа информации акустического сигнала, полученного в результате оптоакустического эффекта.

Ключевые слова: оптоакустика; эритроцит; акустический сигнал; агрегация.

© Кравчук Д. А., 2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Южный федеральный университет ИНЭП ул. Шевченко, 2, корп. «Е», г. Таганрог 347922, Российская Федерация

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Кравчук Д. А. Моделирование процесса агрегации эритроцитов методом Монте-Карло для диагностики оптоакустическим методом // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 118–125.

Поступила в редакцию 02.04.2020

Подписана в печать 28.04.2020

Опубликована 25.05.2020

# Simulation of the Erythrocyte Aggregation Process by the Monte Carlo Method for Diagnostics by the Optoacoustic Method

# Denis A. Kravchuk<sup>1</sup> ⋈

### **Abstract**

Purpose of research. The aim of the study is to develop a mathematical model of aggregated erythrocytes to obtain quantitative parameters of the state of blood elements using the optoacoustic effect. In recent years, more and more research has been carried out in the field of pulsed optoacoustic diagnostics of blood in vivo and in vitro. Optoacoustic techniques combine the high optical contrast of optical tomography with the high resolution of ultrasound techniques.

Methods. Simulation of red blood cells using the Monte Carlo method in Matlab 2020b. Development of an algorithm for the aggregation of erythrocytes into clusters. An absorption model is used that includes an absorbing cell in which we can measure the pressure profile of the acoustic signal. The resulting pressure of the acoustic signal can be used to simulate a signal from one cell through a monolayer of different numbers of cells.

Results. Model images of simulated tissue sections, 200 × 200 µm in size, aggregated and non-aggregated erythrocytes were obtained. The calculation of the level of the spectral power density of the acoustic signal obtained as a result of the optoacoustic effect for various percentages of erythrocyte aggregation has been carried out. The results obtained using the optoacoustic method make it possible to conclude that it is possible to identify the aggregation of erythrocytes in vitro and in vivo.

Conclusion. It was found that the amplitude of the spectral power density increased with an increase in the percentage of aggregation. The possibility of determining the level of aggregation of erythrocytes in the blood by the optoacoustic method is shown. The results of this study can help us understand the challenges facing the use of the optoacoustic method. It is necessary to develop new strategies for the development and production of sensors and algorithms for the identification and analysis of acoustic signal information resulting from the optoacoustic effect.

Keywords: optoacoustics; erythrocyte; acoustic signal; aggregation.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kravchuk D. A. Simulation of the Erythrocyte Aggregation Process by the Monte Carlo Method for Diagnostics by the Optoacoustic Method. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychisliteľnaja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020; 10(2): 118-125. (In Russ.)

Received 02.04.2020 Published 25.05.2020 Accepted 28.04.2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Southern Federal University Shevchenko str. 2E, Taganrog 347922, Russian Federation

# Введение

Оптоакустическая диагностика тканей становится уникальным неинвазивным инструментом для установления агрегации эритроцитов in vivo. Это метод визуализации, который использует количественные параметры обратного рассеяния ультразвука, затухание, скорость звука, нелинейность ткани, статистику ДЛЯ выявления внутренних свойств ткани. Основные успехи в этой области были недавно достигнуты в области мониторинга апоптоза клеток [1; 2; 3], характеристики остеопороза [4], характеристики фиброаденомы [5; 6]. В большинстве случаев спектральный состав ультразвукового сигнала, обратно рассеянного тканью, используются для определения ее акустических свойств и выявления ее микроструктуры и состава.

Целью исследования является получение количественных параметров, которые отражают агрегатное состояние элементов крови с помощью оптоакустического эффекта. Хорошо известно, что эритроциты агрегируют с образованием сложных трехмерных структур в зависимости от равновесия между агрегационными силами, которые опосредуются мембранными факторами эритроцитов и концентрацией плазматических высокомолекулярных белков, таких как фибриноген, и индуцируемыми дезагрегирующими силами за счет сдвиговых эффектов потока, а также электростатических и стерических взаимодействий между эритроцитами [7; 8]. Это явление нормальное и обратимое. Однако гиперагрегация эритроцитов - это патологическое состояние. Клинические и эпидемиологические исследования определили его как независимый фактор риска нарушений кровообращения, таких как тромбоз глубоких вен, атеросклероз [9; 10] и сахарный диабет [11], и это лишь некоторые из них. Поскольку эти заболевания характеризуются локальными поражениями крови и кровеносных сосудов, это предполагает, что зависящие от потока реологические параметры, такие как агрегация эритроцитов, могут быть вовлечены в их соответствующий патогенез. Таким образом, было бы очень интересно выяснить и изучить процесс агрегации эритроцитов in vivo и in vitro с помощью оптоакустического метода.

### Материалы и методы

Моделирование проведем с помощью метода Монте-Карло в среде Matlab 2020b. Алгоритм моделирования представлен на рисунке 1. На первоначальном этапе задается уровень гематокрита в соответствии с количеством эритроцитов. Вычисления проводились для образцов крови с 40% гематокрита и при различных условиях кластеризации (агрегации). Уровень гематокрита 40% выбран, поскольку близок к нормальному значению гематокрита крови человека [12]. Затем рассчитывались координаты случайно распределенных эритроцитов с учетом неперекрытия. Размер области моделирования составлял 200×200 мкм. Рассчитывалось количество кластеров с гексагональной упаковкой эритроцитов и количество эритроцитов в кластере путем задания процента агрегации. Радиус вращения (кластера) агрегата определяется выражением

$$R_g = \left(\frac{3}{5}a^2 + \frac{1}{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} r_j^2\right)^{1/2},\tag{1}$$

где n<sub>c</sub> - число ячеек, присоединенных к кластеру, а г<sub>і</sub> – расстояние центра ј-й ячейки от центра кластера; а - радиус эритроцита.

На рисунке 2 представлены результаты трехмерного моделирования максимальной упаковки эритроцитов в кластеры методом Монте-Карло.

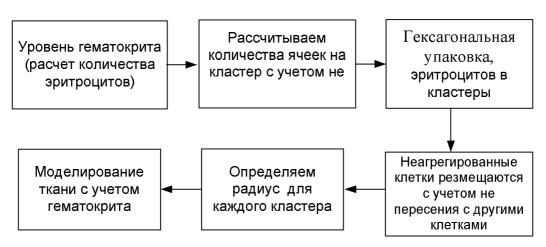


Рис. 1. Алгоритм моделирования процесса агрегации эритроцитов

Fig. 1. Algorithm for modeling the process of aggregation of erythrocytes

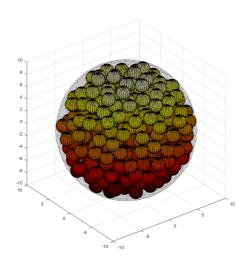
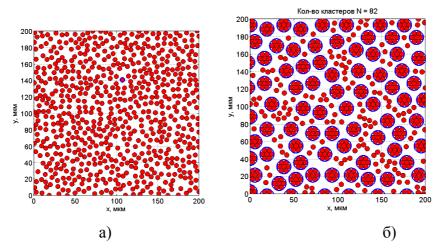


Рис. 2. Трехмерная модель упаковки эритроцитов в кластеры

Fig. 2. Three-dimensional model of packing erythrocytes into clusters

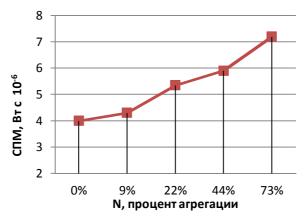
# Результаты и их обсуждение

На рисунке 3,6 приведена модель ткани с максимальным уровнем агрегации при 40%-ном гематокрите, размер агрегата (кластера)  $R_g = 8$  мкм, в котором находятся 7 эритроцитов радиуса 2,7 мкм.



**Рис. 3**. Моделируемые эритроциты при 40%-ном гематокрите; а — неагрегированные эритроциты; б — максимальный уровень агрегации эритроцитов при 7 эритроцитах в кластере

Fig. 3. Modeled erythrocytes at 40% hematocrit: a – not aggregated erythrocytes;
6 – the maximum level of erythrocyte aggregation with 7 erythrocytes in a cluster



**Рис. 4**. Амплитуда спектральной плотности мощности акустического сигнала при оптоакустическом преобразовании в зависимости процента агрегации

**Fig. 4**. Amplitude of the spectral power density of the acoustic signal during optoacoustic conversion, depending on the percentage of aggregation

# Выводы

Проведено математическое моделирование процесса агрегации эритроцитов для регистрации уровня агрега-

ции оптоакустическим методом. Разработанная модель позволяет проводить расчеты акустического сигнала, сформированного в результате оптоакустического преобразования на моделях агрегированных И неагрегированных эритроцитов [12; 13; 14]. Рассчитана амплитуда спектральной плотности мощности (СПМ) для акустического сигнала, сформированного в результате оптоакустического преобразования в

моделируемой ткани с агрегированными эритроцитами (рис. 4). Установлено, что амплитуда СПМ возрастала с ростом процента агрегации. Это позволяет сделать вывод о возможности определения уровня агрегации эритроцитов в крови оптоакустическим методом.

# Список литературы

- 1. Кравчук Д. А. Экспериментальное исследование акустических сигналов при оптоакустическом эффекте в суспензии с полистирольными дисками как моделями эритроцитов // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 70-73.
- 2. Wavelength selection in measuring red blood cell aggregation based on light transmittance / M. Uyuklu, M. Canpolat, H. J. Meiselman, O. K. Baskurt // J. Biomed. Opt. 2011. No. 16(11). P. 117006.
- 3. Meiselman H. J. Red blood cell aggregation: 45 years being curious // Biorheology. 2009. No. 46(1). P. 1–19.
- 4. Effects of red cell aggregation on the venous microcirculation / P. C. Johnson, J. J. Bishop, S. Popel, M. Intaglietta // Biorheology. 1999. No. 36(5-6). P. 457–460
- 5. Handbook of Hemorheology and Hemodynamics / O. K. Baskurt, M. R. Hardeman, M. W. Rampling, H. J. Meiselman. Amsterdam: IOS Press, 2007.
- 6. Baskurt O. K., Temiz A., Meiselman H. J. Red blood cell aggregation in experimental sepsis // J. Lab. Clin. Med. 1997. No. 130(2). P. 183–190.
- 7. Evaluación de alteraciones hemorreológicas en pacientes hipertensos. Hemorheological alterations in hypertensive patients / P. Foresto, M. D'Arrigo, F. Filippini, R. Gallo, L. Barberena, L. Racca, J. Valverde // Medicina B. Aires. 2005. No. 65(2). P. 121–125.
- 8. Length of sedimentation reaction in undiluted blood (erythrocyte sedimentation rate): variations with sex and age and reference limits / E. Piva, M. C. Sanzari, G. Servidio, M. Plebani // Clin. Chem. Lab. Med. 2001. No. 39(5). P. 451–454.
- 9. Baskurt O. K., Meiselman H. J. Cellular determinants of low-shear blood viscosity // Biorheology. 1997. No. 34(3). P. 235–247.
- 10. Syllectometry: The effect of aggregometer geometry in the assessment of red blood cell shape recovery and aggregation / J. G. G. Dobbe, G. J. Streekstra, J. Strackee, M. C. M. Rutten, J. M. A. Stijnen, C. A. Grimbergen // IEEE Biomed. Eng. New York, 2003. No. 50. P. 97–106.
- 11. Meiselman H. J. Red blood cell aggregation: 45 years being curious // Biorheology. 2009. No. 46. P. 1–19.

- 12. Kravchuk D. A., Starchenko I. B. 3D simulation of aggregation of red blood cells for the study of the optoacoustic response // High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing, HIRM, 2019. P. 012088.
- 13. Кравчук Д. А., Орда-Жигулина Д. В. Экспериментальные исследования оптоакустического воздействия на модель эритроцитов в присутствии углеродных наночастиц // Biomedical Photonics. 2019. Т. 8, № 3. С. 11-18.
- 14. Кравчук Д. А. Моделирование акустического сигнала от источников различной формы при оптоакустическом эффекте в жидкости // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 4. С. 124-128.

# References

- 1. Kravchuk D. A. Eksperimental'noe issledovanie akusticheskikh signalov pri optoakusticheskom effekte v suspenzii s polistirol'nymi diskami kak modelyami eritrotsitov [An experimental study of acoustic signals with an optoacoustic effect in suspension with polystyrene disks as models of red blood cells]. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2020, no. 4, pp. 70-73. (In Russ.)
- 2. Uyuklu M., Canpolat M., Meiselman H. J., Baskurt O. K. Wavelength selection in measuring red blood cell aggregation based on light transmittance. J. Biomed. Opt., 2011, no. 16(11), p. 117006.
- 3. Meiselman H. J. Red blood cell aggregation: 45 years being curious. Biorheology, 2009, no. 46(1), pp. 1–19.
- 4. Johnson P. C., Bishop J. J., Popel S., Intaglietta M. Effects of red cell aggregation on the venous microcirculation. Biorheology, 1999, no. 36(5-6), pp. 457–460
- 5. Baskurt O. K., Hardeman M. R., Rampling M. W., Meiselman H. J. Handbook of Hemorheology and Hemodynamics. Amsterdam, IOS Press, 2007.
- 6. Baskurt O. K., Temiz A., Meiselman H. J. Red blood cell aggregation in experimental sepsis. J. Lab. Clin. Med., 1997, no. 130(2), pp. 183–190.
- 7. Foresto P., D'Arrigo M., Filippini F., Gallo R., Barberena L., Racca L., Valverde J. Evaluación de alteraciones hemorreológicas en pacientes hipertensos. Hemorheological alterations in hypertensive patients. Medicina B. Aires, 2005, no. 65(2), pp. 121–125.
- 8. Piva E., Sanzari M. C., Servidio G., Plebani M. Length of sedimentation reaction in undiluted blood (erythrocyte sedimentation rate): variations with sex and age and reference limits. Clin. Chem. Lab. Med., 2001, no. 39(5), pp. 451–454.
- 9. Baskurt O. K., Meiselman H. J. Cellular determinants of low-shear blood viscosity. Biorheology, 1997, no. 34(3), pp. 235–247.
- 10. Dobbe J. G. G., Streekstra G. J., Strackee J., Rutten M. C. M., Stijnen J. M. A., Grimbergen C. A. Syllectometry: The effect of aggregometer geometry in the assessment of

red blood cell shape recovery and aggregation. IEEE Biomed. Eng. New York, 2003, no. 50, pp. 97-106.

- 11. Meiselman H. J. Red blood cell aggregation: 45 years being curious. Biorheology, 2009, no. 46. pp. 1–19.
- 12. Kravchuk D. A., Starchenko I. B. 3D simulation of aggregation of red blood cells for the study of the optoacoustic response. High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing, HIRM, 2019, p. 012088.
- 13. Kravchuk D. A., Orda-Zhigulina, D. V. Eksperimental'nye issledovaniya optoakusticheskogo vozdeistviya na model' eritrotsitov v prisutstvii uglerodnykh nanochastits [Experimental studies of optoacoustic effect on the model of erythrocytes in the presence of carbon nanoparticles]. Biomedical Photonics, 2019, no. 8 (3), pp. 11-18. (In Russ.)
- 14. Kravchuk D. A. Modelirovanie akusticheskogo signala ot istochnikov razlichnoi formy pri optoakusticheskom effekte v zhidkosti [Simulation of an acoustic signal from sources of various shapes with an optoacoustic effect in a liquid]. Nauchnoe Priborostroenie = Scientific instrumentation, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 124–128. (In Russ.)

# Информация об авторе / Information about the Author

Кравчук Денис Александрович, кантехнических наук, дидат доцент, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» ИНЭП, г. Таганрог, Российская Федерация e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Denis A. Kravchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation e-mail: kravchukda@sfedu.ru

# Оригинальная статья / Original article

УДК 67.02

# Модификация металлической связки для увеличения времени износа алмазных боров. Сравнительная оценка износостойкости стандартных и гибридных стоматологических боров

# Л. В. Половнева<sup>1,2</sup>, В. П. Чуев<sup>1,2</sup>

⊠ e-mail: l.polovneva@oezvladmiva.bizml.ru

### Резюме

**Цель исследования**. В современном мире с развитием стоматологической индустрии потребность в качественном, надежном стоматологическом вращающемся инструменте актуальна и высока. Качество стоматологического бора определяется рядом факторов, одним из которых является износостойкость. Данная характеристика абразивного гальванического инструмента зависит от прочности металлической связки, удерживающей препарирующий алмаз на его рабочей части. Цель работы заключается в разработке способа изготовления вращающегося абразивного инструмента с модифицированной металлической связкой, создающей прочный и надежный каркас рабочему алмазу, испытывающему нагрузки в процессе обработки твердых тканей зуба, металла, керамики и т. д. Это обеспечит увеличение износостойкости, качество препарирования и продление срока эксплуатации инструмента. Необходимо аналитически доказать эффективность предлагаемого способа.

**Методы**. В статье рассмотрен способ увеличения износостойкости гальванического алмазного инструмента за счёт дополнительного введения в металлическую связку боров алмазного порошка, размер которого составляет 30-50% размера рабочего алмаза, т. е. создания гибридного стоматологического вращающегося инструмента. В ходе исследования проведен сравнительный анализ производительности стандартных и гибридных боров методом резания никель-хромового сплава.

**Результаты**. Положительный эффект предложенного способа экспериментально подтвержден результатами сравнительных испытаний определения износостойкости стандартного и модифицированного алмазного стоматологического вращающегося инструмента.

Заключение. Практические результаты заключаются в разработке способа изготовления металлической связки стоматологического бора с упрочненными эксплуатационными характеристиками. Клиническая оценка модифицированного инструмента, проведенная в стоматологической клинике города Белгорода, показала значительное преимущество по производительности в сравнении со стандартным бором.

**Ключевые слова**: стоматологический вращающийся инструмент; металлическая связка гибридные алмазные боры; износостойкость; время износа; ОЭЗ; «ВладМиВа».

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ») ул. Победы, 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа» ул.Студенческая,19, г. Белгород 308023, Российская Федерация

<sup>©</sup> Половнева Л. В., Чуев В. П., 2020

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Половнева Л. В., Чуев В. П. Модификация металлической связки для увеличения времени износа алмазных боров. Сравнительная оценка износостойкости стандартных и гибридных стоматологических боров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 126–139.

Поступила в редакцию 02.04.2020

Подписана в печать 28 04 2020

Опубликована 25.05.2020

# Modification of the Metal Bond to Increase the Wear Time of Diamond Burs. Comparative Assessment of Wear Resistance of Standard and Hybrid Dental Burs

Liliya V. Polovneva 1,2, Vladimir P. Chuev 1.2

e-mail: l.polovneva@oezvladmiva.bizml.ru

#### **Abstract**

Purpose of research. In the modern world, with the development of the dental industry, the need for high-quality, reliable dental rotary instruments is relevant and high. The quality of dental boron is determined by a number of factors, one of which is wear resistance, which depends on the strength of the metal ligament that holds the dissecting diamond on the working part of the tool. The purpose of the work is to develop a method for manufacturing a rotating abrasive tool with a modified metal bond, which creates a strong and reliable framework for a working diamond, which is subjected to loads during the processing of hard tooth tissues, metal, ceramics, etc. This will provide increased wear resistance, preparation quality and longer instrument life. It is necessary to analytically prove the effectiveness of the proposed method.

Methods. The article describes a method for increasing the wear resistance of electroplated diamond tools by introducing additional diamond powder into the metal bundle of bores, the size of which is 30-50% of the size of the working diamond, i.e. creating a hybrid dental rotating tool. In the course of the study, a comparative analysis of the performance of standard and hybrid hogs by cutting Nickel-chromium alloy was carried out.

Results. The positive effect of the proposed method is experimentally confirmed by the results of comparative tests for determining the wear resistance of standard and hybrid diamond boron.

Conclusion. The practical results are in the development of a method for manufacturing a metal bond of a dental bur with enhanced performance characteristics. Clinically modified, carried out in the dental clinic of the city of Belgorod, showed a significant performance advantage in comparison with a standard bur.

Keywords: dental rotating instrument; metal bond; hybrid diamond burs; wear resistance; wear time; SEZ; VladMiVa.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Polovneva L. V., Chuev V. P. Modification of the Metal Bond to Increase the Wear Time of Diamond Burs. Comparative Assessment of Wear Resistance of Standard and Hybrid Dental Burs. Izvestiya Yugo-Zapadnogo

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Belgorod State National Research University"(NRU "BelSU") Victory str. 85, Belgorod 308015, Russian Federation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> "Experimental and experimental plant" VladMiVa " Student str. 19, Belgorod 308023, Russian Federation

gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020; 10(2): 126–139. (In Russ.)

Received 02.04.2020

Accepted 28.04.2020

Published 25.05.2020

## Введение

Современный научный мир стоматологии ежегодно предлагает врачу стоматологу все новые усовершенствованные методики лечения зубов своих пациентов. Но препарирование полости зуба все еще проводят методом «сверления» стоматологическими борами, к которым в свою очередь выдвигаются все более жесткие требования и которые нуждаются в непрерывной модернизации и усовершенствовании [1; 2]. Независимо от функционального назначения ротационного стоматологического инструмента, наиболее значимой является рабочая его часть. Алмазный стоматологический бор представляет собой классический образец абразивного инструмента, который состоит из металлического стержня и рабочей части, покрытой слоем алмазных зерен определенной фракции.

Выбирая вращающийся инструмент для различных клинических задач, обращают особое внимание на его износостойкость. Выделяют несколько факторов, влияющих на износостойкость алмазного гальванического вращающегося инструмента: форма и размеры инструмента, размер и способ нанесения алмазных зёрен и рельеф рабочей поверхности, эксплуатационные свойства гальванической связки [3].

Эффективную работу по снятию твердых тканей зуба, цемента, керамики, композитных материалов и т. д. выполняет алмазное зерно [4]. Как правило, в производстве стоматологических боров в качестве абразивного зерна используется натуральный алмаз, что является гарантией максимального срока службы и высокой режущей способности. По минералогической шкале твердости Мооса алмаз является эталоном твердости (10 баллов из 10 возможных) [5; 6; 7]. Особо высокую твердость придает ему кубическая форма кристаллической решетки. В процессе работы бором с натуральным алмазом на кромке грани алмазного зерна происходит микроскалывание, которое создает новую режущую грань. В результате инструмент самозатачивается, что продлевает его срок службы [8].

При рассмотрении воздействия процесса резания обрабатываемой поверхности на рабочую поверхность стоматологического бора выделяют изменения не только формы алмазов за счет сколов, но и изменения связки, удерживающей алмазные зерна. Таким образом, закрепление максимально прочного алмаза в менее прочной связке приведет к снижению эксплуатационных характеристик стоматологического инструмента за счет вырывания нагруженного алмаза из связки. Причиной этого служит, в том числе, и различная теплопроводность двух соприкасающихся фаз. Теплопроводность алмаза значительно выше теплопроводности металлической связки. Известно, что из всех известных в природе тел алмаз обладает наибольшей теплопроводностью – 2000—2600 Вт/(м·К). В процессе резания разогретый алмаз локально нагревает связку, что приводит к ее деформации и повышает вероятность вырывания алмазного зерна [9; 10]. Возникает необходимость перераспределить температуру на больший объём связки для предотвращения потери рабочего зерна. Инженеры ОЭЗ «ВладМиВа» пришли к выводу о целесообразности разработки нового способа изготовления ротационного инструмента.

На основании проведённых исследований запатентован способ изготовления алмазного инструмента (патент на изобретение № 2647723). В результате исследований модифицировали рельеф рабочей поверхности стандартных боров зернистости 160- 220 мкм и 125 - 160 мкм, добавив в связку алмазный порошок зернистостью 50-63 мкм. Это позволило повысить изотропию связки и алмаза. Мелкие алмазные зерна, контактируя с крупными, перераспределяют температуру на больший объём связки, тем самым уменьшая температуру рабочей части инструмента при препарировании, а также снижают вероятность перегрева твердых тканей зуба и осложне-

ния, им вызываемые: травматический пульпит, нарушение структуры твердых тканей зубов [11; 12]. При этом более мелкий алмаз выполняет роль каркаса для порошка основной фракции и служит вспомогательным элементом связующего покрытия [13; 14].

Согласно данному способу, увеличение износостойкости достигается при соблюдении последовательности определенных этапов технологического процесса:

- 1. На стандартно подготовленную (обезжиривание, размагничивание, электрохимическое травление) рабочую часть стальной заготовки закрепляют гальваническим путем крупные алмазные зерна электрически осажденным никелем на 0,1 их размера. При этом площадь покрытия рабочей поверхности заполнена не более 70%.
- 2. Для удаления наслоившихся или слабо закрепившиеся крупных алмазный зерен, для создания необходимого (35-55%) межалмазного пространства проводят электрохимическое протравливание в электролите с серной кислотой.
- 3. Мелкие алмазные зерна наносят на заготовку глубиной 0,2 размера.

Заращивают алмазный порошок металлическим никелем на 2/3 размера алмазного порошка мелкой фракции. В результате крупная фракция алмазных зерен на 60-70% выступает над слоем связки и является основной фракцией. При этом рельеф рабочей поверхности контролируется под микроскопом на каждом этапе технологического процесса (рис.1).

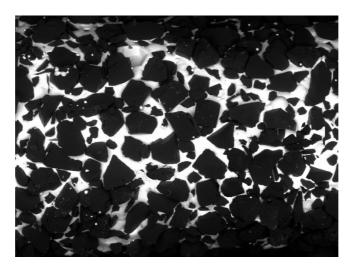


Рис. 1. Рельеф рабочей части модифицированного гибридного стоматологического вращающегося инструмента с алмазом зернистости 125-160 / 50-63мкм (100-кратное увеличение)

Fig. 1. The relief of the working part of the modified hybrid dental rotating instrument with diamond grain size 125-160 / 50-63 microns (100x magnification)

Именно высокая плотность алмазных зёрен мелкой фракции обеспечивает искомое повышение износостойкости алмазных ротационных инструментов грубой и сверх грубой зернистости [15].

На базе Белгородской стоматологической поликлиники № 1 проведен сравнительный анализ стандартных боров с зернистостью 125-160 (рис. 2) и 160-220 мкм и гибридных – с зернистостью 125-160 / 50-63 мкм (см. рис. 1) и 160-220/50-63 мкм.

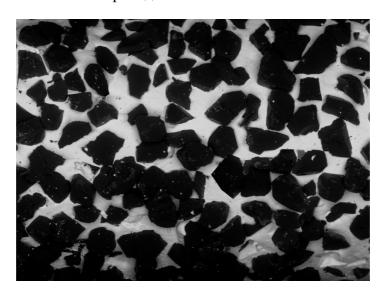


Рис. 2. Рельеф рабочей части стандартного стоматологического вращающегося инструмента с алмазом зернистости 125-160 мкм (100-кратное увеличение)

Fig. 2. The relief of the working part of a standard dental rotary instrument with diamond grain size 125-160 microns (100x magnification)

Определены затраты времени на препарирование зубов как показатель износа стандартных и гибридных боров производства ОЭЗ «ВладМиВа».

Клиническая оценка гибридных боров показала, что интенсивность износа гибридных боров в 2 раза ниже, что обусловливает возможность препарирования 20—30 жевательных зубов. При этом производительность стандартных боров снижается после препарирования 10–15 жевательных зубов [16].

Цель исследования – для подтверждения повышения эксплуатационных характеристик гибридного стоматологического алмазного инструмента провести сравнительный лабораторный анализ времени износа и производительности стандартных (160-220 мкм, 125-160 мкм) и модифицированных (160–220/50–63 125-160/50-63 MKM, мкм) боров при резании никельхромового сплава.

# Материалы и методы

Для проведения сравнительной характеристики были испытаны стоматологические боры каждого типоразмера в количестве по 10 штук.

В качестве материала для резания образцы использовали ИЗ никельхромового сплава толщиной 4,0 мм.

Испытания проводили на установке для определения износостойкости боров, скорость вращения бора 5000 об/ мин при нагрузке 4,0 Н (рис. 3).

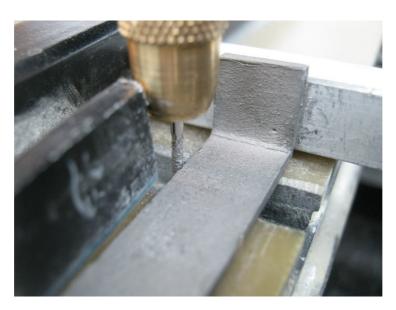


Рис. 3. Установка для определения износостойкости боров (наконечник со стоматологическим бором и образец из никель-хромового сплава)

Fig. 3. Installation for determining the wear resistance of burs (dental bur handpiece and nickel-chromium alloy sample)

Перед резанием новым бором и после каждого последующего двухминутного резания материал для резания взвешивали на аналитических весах Sartorius серии CPA 224S, класс точности по ГОСТ Р 53228-2008 — I (специальный), d-0,0001 $\Gamma$ .

Для оценки рельефа поверхности рабочей части использовали изображение посредством настольного растрового электронного микроскопа-микроанализатора ТМ3030 HITACHI.

При оценивании времени износа учитывалась работоспособность (производительность) стоматологического инструмента как массовая доля срезанного никель-хромового сплава после каждого воздействия бором на сплав в течение 2 минут от начала резания. Производительность исследуемых образцов определяли на основе массовой доли потери обрабатываемого сплава  $(\omega_{\Lambda m}, \%)$ , которая равна отношению разности масс пластины до резания  $(m_0, \Gamma)$  и после каждой двухминутной обработки сплава бором  $(m_{n+1}, \Gamma)$  к массе  $m_0$ , умноженному на 100%. Вычисляли среднее арифметическое значение  $\omega \Delta m_{cp}$ штук боров исследуемых типоразмеров для каждого двухминутного резания.

Сущность абразивного износа заключается в степени разрушения сплава твердыми зернами алмаза при микрорезании трущихся поверхностей. Механизм можно представить как удаление материала (шлама) с изнашиваемой поверхности в виде различного размера кусочков, которые отделяются при воздействии абразива, в виде очень мелкой стружки и фрагментов разрушенного материала, выдавленного абразивной частицей по сторонам пластически деформированной зоны [17].

Испытания проводили до тех пор, пока исследуемый инструмент не терял работоспособность. Время, в течение которого значение  $\omega \Delta m_{cp}$  становилось неизменным, считали временем износа боров.

# Результаты и их обсуждение

Производительность стандартных стоматологических боров зернистостью 125-160 мкм за первые две минуты составила 0,086±0,002%. Производительность модифицированных гибридных боров зернистостью 125-160 / 50-63 мкм в первые две минуты резания составила 0,092±0,002 %. Результаты последующих двухминутных обработок представлены ниже (табл. 1).

Работа стандартного бора после десятой минуты не привела к значительному снижению массы образцов. При этом гибридные боры зернистостью 125-160 / 50-63 мкм сохранили возможность резания еще в течение четырех минут, что говорит об увеличении их работоспособности.

Взвешивание сплава после двухминутной обработки стандартными борами зернистостью 160-220 мкм выявило снижение массы на 0,091±0,003 %. Производительность гибридных боров зернистостью 160-220/50-63 мкм после первой обработки сплава соответствует 0,100±0,002 %. Результаты последующих двухминутных обработок представлены ниже (табл. 2).

Таблица 1. Производительность боров зернистостью 125-160 мкм и гибридных боров зернистостью 125-160 / 50-63 мкм

**Table 1**. Productivity of burs with grain size 125-160 microns and hybrid burs with grain size 125-160 / 50-63 microns

Время резания, мин	$\omega \Delta m_{\mathrm{cp,}}\%$				
	125-160 мкм	125-160 / 50-63мкм			
2	$0,086\pm0,002$	0,092±0,002			
4	$0,154\pm0,002$	0,177±0,003			
6	$0,180\pm0,003$	0,243±0,003			
8	$0,195\pm0,002$	0,357±0,002			
10	$0,217\pm0,002$	0,396±0,002			
12	$0,218\pm0,002$	0,415±0,003			
14	-	0,426±0,001			
16	-	0,428±0,002			

Таблица 2. Производительность боров зернистостью 160-220мкм и гибридных боров зернистостью 160-220/50-63мкм

**Table 2**. Productivity of burs with a grain size of 160-220 microns and hybrid burs with a grain size of 160-220 / 50-63 microns

Время резания, мин	$\omega \Delta m_{ m cp,} \%$					
	160-220мкм	160-220/ 50-63мкм				
2	$0,091\pm0,003$	0,100±0,002				
4	$0,153\pm0,002$	0,189±0,003				
6	$0,183\pm0,002$	0,330±0,002				
8	$0,194\pm0,003$	0,390±0,004				
10	$0,199\pm0,002$	0,403±0,002				
12	$0,199\pm0,002$	0,420±0,003				
14	-	0,433±0,003				
16	-	0,438±0,001				
18	-	0,439±0,001				

Сравнительный анализ стандартных и гибридных боров показал, что гибридные боры зернистостью 160-220/50-63 мкм сохраняют возможность резания никель-хромового сплава в течение 16 минут, что на 6 минут дольше стандартного бора. Следовательно, введение в связку мелкого алмазного зерна увеличивает время износа бора [18].

# Выводы

Анализ результатов проведённых испытаний показал, что время износа стандартных боров зернистостью 125160 и 160-220 мкм составляет 10 минут. После десятиминутной резки масса образцов не изменилась. При этом производительность стандартных боров составляет порядка 0,2%.

После десяти минут резания гибридными борами зернистостью 125-160/50-63 мкм и 160-220/50-63 мкм масса образцов снизилась порядка 0,4% и при этом частично сохранена возможность дальнейшего резания, что подтверждается результатами (рис. 4) и рельефом рабочей поверхности боров (рис. 5). Следовательно, время износа гибридных стоматологических боров порядка 14-16 мин.

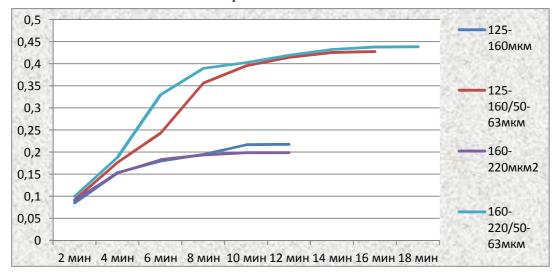


Рис. 4. Динамика снижения массы образцов из никель-хромового сплава ω∆тср, %

Fig. 4. Dynamics of weight reduction of samples from nickel-chromium alloy ω∆mcp, %

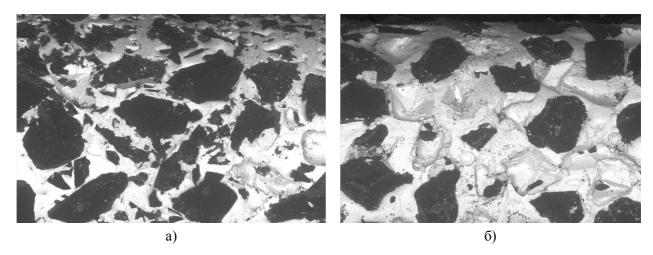


Рис. 5. Рельеф рабочей части: а — модифицированного гибридного стоматологического вращающегося инструмента с алмазом зернистости 125-160 / 50-63 мкм после 10 мин резания; б — стандартного стоматологического вращающегося инструмента с алмазом зернистости 125-160 мкм после 10 мин резания

**Fig. 5**. Relief of the working part: a - of the modified hybrid dental rotating instrument with diamond, grain size  $125-160 / 50-63 \mu m$  after 10 min of cutting; 6 - of a standard dental rotating instrument with diamond, grain size  $125-160 \mu m$  after 10 min of cutting

Таким образом, аналитически и клинически доказано, что введение в металлическую связку стоматологического вращающегося инструмента более мелкого алмазного порошка приводит к значительному увеличению вре-

мени износа боров, что существенно улучшает и качество выполняемых работ врача-стоматолога. Ведь вместе с износом бора теряется качество препарированной поверхности [19; 20].

# Список литературы

- 1. Оценка доверия к алмазным борам АО «ОЭЗ «ВладМиВа» по результатам анкетирования профессионалов столичного региона / А. А. Копытов, А. В. Цимбалистов, Н. С. Мишина, А. А. Копытов // Медицинский алфавит. 2016. № 9 (272). С. 61–64.
- 2. Оценка доверия к алмазным борам АО «ОЭЗ «ВладМиВа» по результатам анкетирования профессионалов Санкт-Петербурга / А. А. Копытов, А. В. Цимбалистов, А. А. Копытов, Н. С. Мишина // Медицинский алфавит. 2016. № 21 (284). С. 65–68.
- 3. Сергейчев К. Ф. Алмазные cvd-покрытия режущих инструментов (обзор) // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3, № 4. С. 342-376.
- 4. Крюков С. А., Славин А. В. Пути совершенствования структурно-механических характеристик и повышения эффективности абразивных инструментов. Волгоград, 2016. C. 100.
- 5. Кулишова А. В. Его величество алмаз // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ): материалы Международной научно-практической конференции / Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ). М., 2018. C 139-141
- 6. Соловьев А. А., Павленко Т. Г. Твердость алмаза // Физика и современные технологии в АПК: материалы XI Всероссийской молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников с международным участием / Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина. Орёл, 2020. С. 118-122.
- 7. Гладченков Е. В. Исследование чистоты поверхности алмаза при термохимическом методе обработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). 2010. № 2. С. 268-280.
- 8. Отличительные особенности и конкурентные преимущества алмазных боров, выпускаемых АО «ОЭЗ "ВЛАДМИВА"» / Л. В. Половнева, Н. С. Мишина, А. А. Копытов, А. В. Цимбалистов, В. П. Чуев // Медицинский алфавит. 2017. № 11. С. 35–39.
- 9. Алмазный инструмент с дисперсно-упрочненной наночастицами связко, для резки высокоармированного бетона / А. А. Зайцев, Д. А. Сидоренко, Е. А. Левашов, В. В. Курбаткина, В. А. Андреев, С. И. Рупасов, П. И. Севастьянов // Сверхтвёрдые материалы. 2010. Т. 32, № 6. С. 78-89.

- 10. Разработка и применение дисперсно-упрочненной связки на основе сплава Си-Ni-Fe-Sn для режущего инструмента из сверхтвердых материалов / А. А. Зайцев, Д. А. Сидоренко, Е. А. Левашов, В. В. Курбаткина, С. И. Рупасов, В. А. Андреев, П. И. Севастьянов // Сверхтвердые материалы. 2012. № 4. С. 75-88.
- 11. Опыт применения устройства для препарирования зубов / А. Н. Пархоменко, В. И. Шемонаев, Т. В. Моторкина, С. И. Кормилицин // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 8. С. 50-53.
- 12. Пат. 2647723 Российская Федерация. Способ изготовления алмазного инструмента / Половнева Л. В., Чуев В. П. Бузов А. А., Копытов А. А., Мишина Н. С. Опубл. 10.03.18, Бюл. № 8.
- 13. Polushin N. I., Ovchinnikovaa M. S., Maslov A. L. The use of alumina nanoparticles as modifiers of galvanic binder of diamond tools // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 199-201.
- 14. Дисперсное упрочнение наночастицами алмазного композиционного электрохимического покрытия / Н. И. Полушин, А. В. Кудинов, В. В. Журавлёв, Н. Н. Степарева, А. Л. Маслов // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 4. С. 49-53.
- 15. Сравнительная оценка времени износа стандартных и гибридных алмазных боров при стендовом нагружении / И. В. Овчинников, Л. В. Половнева, В. П. Чуев, А. А. Копытов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. Фармация. 2019. Т. 42, № 1. С. 73-82.
- 16. Овчинников И. В. Сравнительная оценка эффективности клинического применения стандартных и гибридных алмазных боров // Клиническая стоматология. 2019. № 2. С. 23–25.
- 17. Исследование прочностных характеристик композиционных электрохимических никелевых покрытий с наноалмазами / Н. И. Полушин, М. С. Овчинникова, А. Л. Маслов, И. Ю. Кучина // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, № 7. С. 55-57.
- 18. Овчинников И. В., Копытов А. А. Сравнительная оценка времени износа стандартных и гибридных алмазных боров // Вопросы методологии естествознания и технических наук: современный контекст: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. практ. конф. / под общ. ред. Е. П. Ткачевой. Белгород: Агенство перспективных научных исследований, 2019. С. 70-72.
- 19. Пархоменко А. Н., Шемонаев В. И., Моторкина Т. В. Практическая значимость износа алмазных стоматологических боров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2010. № 4. С. 390-392.
- 20. Шнип Е. В., Наумович С. А. Влияние современных методов препарирования на состояние тканей зубов в ортопедической стоматологии // Современная стоматология. 2016. № 4. С. 14-17.

# References

- 1. Kopytov A. A., Tsimbalistov A. V., Mishina N. S., Kopytov A. A. Otsenka doveriya k almaznym boram AO «OEZ «VladMiVa» po rezul'tatam anketirovaniya professionalov stolichnogo regiona [Assessment of confidence in diamond burs of JSC SEZ VladMiVa based on the results of a survey of professionals in the capital region]. Meditsinskii alfavit = Medical alphabet, 2016, pp. 61-4. (In Russ.)
- 2. Kopytov A. A., Tsimbalistov A. V., Kopytov A. A., Mishina N. S. Otsenka doveriya k almaznym boram AO «OEZ "VladMiVa" po rezul'tatam anketirovaniya professionalov Sankt-Peterburga [Assessment of trust in diamond burs of JSC SEZ VladMiVa based on the results of a survey of professionals in St. Petersburg]. Meditsinskii alfavit = Medical alphabet, 2016, pp. 65-8. (In Russ.)
- 3. Sergeichev K. F. Almaznye cvd-pokrytiya rezhushchikh instrumentov (obzor) [Diamond cvd coatings of cutting tools (Review)]. Uspekhi Prikladnoi Fiziki = Advances in applied physics, 2015, no. 4, 3, pp. 342-376. (In Russ.)
- 4. Kryukov S. A., Slavin A. V. Puti sovershenstvovaniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik i povysheniya effektivnosti abrazivnykh instrumentov [Ways to improve the structural and mechanical characteristics and increase the efficiency of abrasive tools]. Volgograd, 2016, p. 100. (In Russ.)
- 5. Kulishova A. V. [His Majesty Diamond]. Strategiya razvitiya geologicheskogo issledovaniya nedr: nastoyashchee i budushchee (k 100-letiyu MGRI-RGGRU). Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. [Strategy for the development of geological exploration of the subsurface: present and future (to the 100th anniversary of MGRI-RGGRU). Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI -RGGRU), 2018, pp. 139-141. (In Russ.)
- 6. Soloviev A. A., Pavlenko T. G. [Diamond hardness]. Fizika i sovremennye tekhnologii v APK. Materialy KhI Vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov s mezhdunarodnym uchastiem [Physics and modern technologies in the agro-industrial complex. Materials of the XI All-Russian youth conference of young scientists, students and schoolchildren with international participation]. Oryol, Oryol State Agrarian University. N. V. Parakhina Publ., 2020, pp. 118-122. (In Russ.)
- 7. Gladchenkov E. V. Issledovanie chistoty poverkhnosti almaza pri termokhimicheskom metode obrabotki [Investigation of the purity of the diamond surface with a thermochemical method of treatment]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchnotekhnicheskii zhurnal) = Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2010, no. S2, pp. 268-280. (In Russ.)
- 8. Polovnyova L. V., Mishina N. S., Chuev V. P., Kopytov A. A., Tsimbalistov A. V. Otlichitel'nye osobennosti i konkurentnye preimushchestva almaznykh borov, vypuskaemykh AO «OEZ "VLADMIVA"» [Distinctive features and competitive advantages of diamond burs, produced by VladMiVa Co]. Meditsinskii alfavit = Medical alphabet, 2017, no. 11, pp. 35–39. (In Russ.)

- 9. Zaitsev A., Sidorenko D., Levashov E., Kurbatkina V., Andreev V., Rupasov S., Sevastyanov P. Almaznyi instrument s dispersno-uprochnennoi nanochastitsami svyazko, dlya rezki vysokoarmirovannogo betona [Nanoparticle dispersion-hardened diamond tool for cutting highly reinforced concrete]. *Sverkhtverdye materialy = Superhard materials*, 2010, vol. 32, no. 6, pp. 78–89. (In Russ.)
- 10. Zaitsev A., Sidorenko D., Levashov E., Kurbatkina V., Rupasov S., Andreev V., Sevastyanov P. Razrabotka i primenenie dispersno-uprochnennoi svyazki na osnove splava Cu-Ni-Fe-Sn dlya rezhushchego instrumenta iz sverkhtverdykh materialov [Development and application of dispersion-hardened bond based on Cu-Ni-Fe-Sn alloy for cutting tools made of superhard materials]. *Sverkhtverdye materialy = Superhard materials*, 2012, no. 4, pp. 75-88 (In Russ.)
- 11. Parkhomenko A., Shemonaev V., Motorkina T., Kormilitsin S. Opyt primeneniya ustroistva dlya preparirovaniya zubov [Experience in using a device for preparing teeth]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*, 2014, no. 8, pp. 50-53. (In Russ.)
- 12. Polovneva L. V., Chuyev V. P., Buzov A. A., Kopytov A. A., Mishina N. S. Sposob izgotovleniya almaznogo instrumenta [Method of diamond tool making]. Patent RF, no. 2647723, 2018. (In Russ.)
- 13. Polushin N. I., Ovchinnikovaa M. S., Maslov A. L. The use of alumina nanoparticles as modifiers of galvanic binder of diamond tools [The use of alumina nanoparticles as modifiers of galvanic binder of diamond tools]. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 199-201. (In Russ.)
- 14. Polushin N. I., Kudinov A. V., Zhuravlev V. V., Stepareva N. N., Maslov A. L. Dispersnoe uprochnenie nanochastitsami almaznogo kompozitsionnogo elektrokhimicheskogo pokrytiya [Disperse hardening of a diamond composite electrochemical coating by nanoparticles]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Bulletin of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings*, 2011, no. 4, pp. 49-53. (In Russ.)
- 15. Ovchinnikov I. V., Polovneva L. V., Chuyev V. P., Kopytov A. A. Sravnitel'naya otsenka vremeni iznosa standartnykh i gibridnykh almaznykh borov pri stendovom nagruzhenii [Comparative assessment of time of standard wear and hybrid diamond burs for bench loading]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Meditsina. Farmatsiya = Belgorod State University Scientific Bulletin Medicine Pharmacy*, 2019 vol. 42, no. 1, pp. 73-82. (In Russ.)
- 16. Ovchinnikov I. V. Sravnitel'naya otsenka effektivnosti klinicheskogo primeneniya standartnykh i gibridnykh almaznykh borov [Comparative evaluation of the effectiveness of clinical use of standard and hybrid diamond hogs]. *Klinicheskaya stomatologiya = Clinical dentistry*, 2019, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.)
- 17. Polushin N. I., Ovchinnikova M. S., Maslov A. L., Kuchina I. Yu. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh nikelevykh pokrytii s nanoalmazami [Investigation of the strength characteristics of composite electrochemical nickel coatings with nanodiamonds]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khi*-

 $miya\ i\ khimicheskaya\ tekhnologiya = Proceedings\ of\ higher\ educational\ institutions.$  Series: Chemistry and Chemical Technology, 2015, vol. 58 no. 7, pp. 55-57. (In Russ.)

- 18. Ovchinnikov I.V., Kopytov A. A. [Comparative assessment of the wear time of standard and hybrid diamond drills]. Voprosy metodologii estestvoznaniya i tekhnicheskikh nauk: sovremennyi kontekst. Sb. nauch. tr. po materialam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [The methodology of the natural Sciences and the technical Sciences: a contemporary context. Collection of scientific papers on the materials of the International scientific and practical conference]; ed. by E. P. Tkacheva. Belgorod, Agency for Advanced Scientific Research, 2019, pp. 70-72. (In Russ.)
- 19. Parkhomenko A. N., Shemonaev V. I., Motorina T. V. Prakticheskaya znachimost' iznosa almaznykh stomatologicheskikh borov [The practical significance of the wear of the diamond dental burs]. Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Meditsina = Bulletin of the peoples 'friendship University of Russia. Series: Medicine, 2010, no. 4, pp. 390-392. (In Russ.)
- 20. Shnip E. V., Naumovich S. A. Vliyanie sovremennykh metodov preparirovaniya na sostoyanie tkanei zubov v ortopedicheskoi stomatologii [Influence of modern methods of preparation on the state of dental tissues in orthopedic dentistry]. Sovremennaya stomatologiya = Modern dentistry, 2016, no. 4, pp. 14-17. (In Russ.)

# Информация об авторах / Information about the Authors

Половнева Лилия Васильевна, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; начальник отдела технического контроля АО «ОЭЗ "ВладМиВа"», Белгород, Российская Федерация e-mail: l.polovneva@oezvladmiva.bizml.ru

Чуев Владимир Петрович, доктор технических наук, академик АМТН РФ, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; генеральный директор АО «ОЭЗ "ВладМиВа"», Белгород, Российская Федерация

e-mail: postmaster @ vladmiva. ru ORCID: 0000-0002-1033-0789 Researcher ID: AAH-3425-2019

Liliya V. Polovneva, Post-Graduate Student of the Department of Information and Robotic Systems Belgorod State National Research University; Head of Technical Control Department of JSC "VladMiVa"», Belgorod, Russian Federation

e-mail: l.polovneva@oezvladmiva.bizml.ru

Vladimir P. Chuev, Dr. of Sci. (Engineering), Academician of the Amtn of the Russian Federation, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University; General Director of JSC «SEZ "VladMiVa"», Belgorod, Russian Federation

e-mail: postmaster @ vladmiva. ru ORCID: 0000-0002-1033-0789 Researcher ID: AAH-3425-2019

# К сведению авторов

- 1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.
  - 2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:
- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
  - разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
  - лицензионный договор.
  - 3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.
  - 4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.
  - 5. Публикация бесплатная.
- 6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу -2.5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ -1.5 см.
- 7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

- 8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.
- 9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный -12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс -5 пт; крупный символ -18 пт; мелкий символ -12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора** – **75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!** 

Все русские и греческие буквы  $(\Omega, \eta, \beta, \mu, \omega, \upsilon$  и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

- 10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).
- 11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания не допускаются.

- 12. Список литературы к статье обязателен и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.
  - 13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio\_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/.